



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ADAPTACIÓN FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO RAPEL:
ANÁLISIS DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

MARÍA JOSÉ GONZÁLEZ MOLINA

PROFESORA GUÍA
HAYDEE XIMENA VARGAS MESA

PROFESOR CO-GUÍA
NICOLÁS VÁSQUEZ PLACENCIA

MIEMBRO COMISIÓN
EDUARDO RUBIO ÁLVAREZ

SANTIAGO DE CHILE
AÑO 2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL

POR: MARÍA JOSÉ GONZÁLEZ MOLINA

FECHA: 15//07/2020

PROFESORA GUÍA: HAYDEE XIMENA VARGAS

ADAPTACIÓN FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO RAPEL: ANÁLISIS DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA.

De acuerdo con las proyecciones asociadas al cambio climático, se espera en Chile Central, un aumento de la temperatura y disminución de la precipitación. Esto conlleva una reducción de la escorrentía que, en paralelo al aumento de la demanda de recursos hídricos, hacen necesario analizar el efecto de estos cambios en las componentes del ciclo hidrológico.

La cuenca del Río Rapel, ubicada en Chile Central, presenta una actividad agrícola relevante económicamente, que depende de la disponibilidad hídrica estival, por lo que su desarrollo es sensible a las proyecciones futuras climáticas. Por esta razón, este trabajo se centra en el estudio de las modificaciones del uso de suelo agrícola en la cuenca del Río Rapel, con el fin de recomendar cambios en su matriz de cultivos.

Para representar la variación espacial de las componentes del ciclo hidrológico se utiliza el modelo hidrológico VIC (Variable Infiltration Capacity) y los resultados del balance hídrico desarrollado por DGA (2018). Se simula la cuenca en régimen natural, en base a los registros meteorológicos históricos (1979-2014) derivados del producto grillado CR2MET. Para las forzantes futuras (2015-2060) se utilizan los modelos de circulación global: CCSM4 (Community Climate System Model), CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), IPSL (Institut Pierre Simon Laplace), y MIROC (Model for Interdisciplinary Research on Climate), asociados al escenario de emisiones de dióxido de carbono RCP8.5.

Se seleccionan 40 cultivos característicos de la zona de estudio, y se estima su demanda evapotranspirativa asociada a riego y la escorrentía. Luego, se evalúan escenarios que varían de acuerdo con la distribución de cultivos, su ubicación y al área máxima cultivada.

A nivel de celda la demanda evapotranspirativa presentan diferencias entre cultivos, de 350 a 1250 mm/año, mientras que para la escorrentía entre 500 a 700 mm/año. A nivel de cuenca, se proyecta una reducción de la escorrentía entre 8% a 13% para los años 2015-2039 y de 11% a 30% para 2040-2059, principalmente en el periodo de deshielo, donde no se aprecian diferencias significativas entre escenarios.

Se realiza un balance entre disponibilidad hídrica versus demanda hídrica total, que incluye los derechos de aprovechamiento de agua de la DGA. Se concluye para todos los escenarios planteados, entre diciembre a marzo, proyectan déficit en Cachapoal, mientras que en Tinguiririca se identifican escenarios en donde es posible suplir la demanda hídrica total. Debido a la disponibilidad de agua a nivel anual, es necesario tomar medidas de almacenamiento de la escorrentía para los meses de déficit, cambiando la dependencia histórica del uso del caudal de deshielo por la actividad agrícola.

A la araucaria, al viento y al bosque.

A mi abuela, mi madre, mi hermana, sobrinas,

a mi padre, a mi tío y a Charles.

Agradecimiento

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia. A mi madre que siempre ha creído en mí, siempre me ha apoyado a pesar de todas las dificultades. Siempre serás mi fortaleza, gracias por ser esa gran madre, mujer y profesora. A mi padre por mostrarme lo bello de la naturaleza desde pequeña. También agradecer a mi hermana, por darme tanto amor, ser un gran apoyo, y por regalarme unas maravillosas sobrinas. A Tais y Mayda, por ser cariñosas, alegres y descubridoras del mundo. A mi tío Rene por todo su cariño. Espero que pronto podamos abrazarnos, y hacer todos nuestros planes.

Gracias a mi novio Charles, por quererme tanto, cuidarme siempre y apoyarme en todo sentido. Por compartir nuestro sentir en la lucha social y en maravillarnos de esta bella Tierra. Gracias por compartir tu linda familia con la mía, y por vivir la vida como hermosa canción.

Gracias a mis amigas del colegio, a la tola y dani, que siempre están ahí. A mis amigas de la u, meli vargas, nati Aravena y ale vargas, por todos los momentos vividos. A mi amiga catita pino y andreita navarro, por todo su cariño. A mis amigos de civil, sergio jilberto y cristobal. A cristobal, en particular, por juntarnos con la María Paz. Y a Tomás carrasco por enseñarme a ser toda una computina.

A Crispin y María Paz, por ser muy buenos amigos, por siempre estar atentos. Por ser un muy buen vecino y amigo. A María Paz, por ser una muy buena amiga, siempre motivándome y soñando juntas.

A mis compañeras hidráulicas, por siempre apoyarnos en este camino, entre ellas, ale isamit, cote chacon, emi pinto, nitza miranda, nati rojas y coni vasquez. Y a camila molina y cata aranguiz, que pude conocer al final.

Agradecer al profe Miguel, por ser un excelente profesor y persona, y por motivarme en el camino de la hidrología. También, agradecer al grupo de hidrología, en particular al diego h, dimitri y eduardo.

Agradecer a mi profesora guía, Haydee Ximena Vargas, por ser un factor de motivación para mí y para las mujeres que ingresamos a esta carrera. Por ser una excelente profesora, dedicada, y preocupada. Por motivarme sin saberlo, junto al profe miguel a buscar el camino de la hidrología. Gracias por estar siempre atenta y sobre todo por confiar en mí. Fue un agrado ser su memorista y tenerla de jefa también.

Gracias a mi co-guía Nicolás, por ser un factor muy importante en esta memoria y por motivarme demasiado y alentarme en cada paso, y ser una excelente persona. A Eduardo Rubio, por nuestras conversaciones sobre mi tesis, a pesar de las dificultades.

Powered@NLHPC: Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02).

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Organización del informe.....	2
2	ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	2
2.1	Modelación hidrológica.....	2
2.2	Modelo hidrológico VIC	4
2.2.1	Generalidades.....	5
2.2.2	Parámetros de entrada no vegetacionales	5
2.2.3	Balance de masa.....	5
2.2.4	Definición de parámetros vegetacionales	11
2.2.5	Utilización de imágenes satelitales Landsat 8 y el modelo de elevación ALOS PALSAR	15
2.2.6	Forzantes meteorológicas	17
3	ANTECEDENTES ZONA DE ESTUDIO.....	18
3.1	Descripción de la zona de estudio	18
3.1.1	Generalidades.....	18
3.1.2	Climatología.....	20
3.1.3	Uso de suelo.....	20
3.2	Información disponible sobre agricultura.....	22
4	METODOLOGÍA.....	26
4.1	Mejora del uso de suelo CB	26
4.2	Determinación parámetros vegetacionales.....	29
4.2.1	Parámetros vegetaciones a partir de imágenes satelitales.....	29
4.2.2	Parámetros vegetaciones a partir de información bibliografía	31
4.3	Variables output empleados en el análisis.....	32
4.4	Análisis de los parámetros vegetacionales.....	33
4.4.1	Primer análisis de sensibilidad general	33
4.4.2	Primer análisis de sensibilidad para <i>LAI</i> y <i>Rmin</i>	34
4.5	Respuesta hidrológica de los cultivos en la zona de estudio.....	34
	Etapa I - Cálculo de la respuesta hidrológica de los cultivos.	35
	Etapa II: Zona óptima de los cultivos.	35

Etapa III: Definición de grupos de cultivos según respuesta hidrológica.....	35
4.6 Escenarios futuros planteados	36
4.6.1 Definición de los criterios para definir los escenarios futuros.....	36
4.6.2 Descripción escenarios futuros.	37
4.6.3 Análisis de resultados de los escenarios planteados.	38
5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
5.1 Parámetros vegetacionales del modelo.....	40
5.1.1 Parámetros vegetacionales que varían mensualmente.	40
5.1.2 Parámetros vegetacionales fijos del modelo	42
5.1.3 Análisis de los parámetros vegetacionales del modelo.....	48
5.2 Análisis para determinar fracciones óptimas.....	50
5.2.1 Comparación respuesta hidrológicas de los cultivos para las forzantes históricas ...	50
5.2.2 Comparación respuesta hidrológicas futura de los cultivos según GCM.	52
5.2.3 Definición de grupos de cultivos.	52
5.3 Variación de la demanda según zona geográfica	56
5.3.1 Cambio zonas óptimas por cultivos	57
5.4 Análisis evapotranspiración natural y evapotranspiración potencial	58
5.5 Resultados escenarios futuros	60
5.5.1 Criterio para definición de los escenarios	60
5.5.2 Resultados de los escenarios a nivel anual	66
5.5.3 Resultados escenarios: cambio a nivel estacional.....	70
5.5.4 Análisis de la demanda evapotranspirativa y escorrentía de los escenarios planteados.	73
5.5.5 Balance entre disponibilidad y demanda hídrica total.	76
6 CONCLUSIONES	82
Bibliografía.....	86
Anexos.....	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Parámetros vegetacionales del modelo VIC.....	11
Tabla 2.2: Bandas imágenes satelitales Landsat 8. Fuente: USGS (2020).	16
Tabla 3.1: Porcentaje del cada tipo de uso de suelo, para cuenca del río Rapel. Fuente: (Zhao et al., 2016)	21
Tabla 3.2: Cultivos ordenados según porcentajes cultivos del Censo Agropecuario y Forestal 2007 (NIVEL II).....	23
Tabla 4.1: Porcentaje de cultivo estimado para las 40 clases, para cada subcuenca de la zona de estudio. Fuente: Censo Agropecuario y Forestal 2007 (IDE).....	28
Tabla 4.2: Fuente de imágenes Landsat 8 utilizadas para los grupos de cultivos.....	30
Tabla 5.1: Rmin (Resistencia mínima del follaje): valores y fuentes.	42
Tabla 5.2: Valores de la altura máxima de los cultivos y sus fuentes.....	43
Tabla 5.3: Supuestos fracción de tronco libre de ramas/hojas (parámetro Trunk_ratio).....	44
Tabla 5.4: Root Depth y Root fraction (Profundidad y fracción de raíces por capa): valores y fuentes.	46
Tabla 5.5: Distribución de cultivos aplicado en los escenarios planteados.	61
Tabla 5.6: Características de los escenarios futuros y el CBC, para la subcuenca de Cachapoal (C) y Tinguiririca (T).....	65
Tabla 5.7: Porcentaje de cambio anual en la escorrentía (E), precipitación (P), evapotranspiración (ET) y demanda evapotranspiraría (DE), en cada escenario futuro para la subcuenca de Cachapoal.	67
Tabla 5.8: Porcentaje de cambio anual en la escorrentía (E), precipitación (P), evapotranspiración (ET) y demanda evapotranspiraría (DE), para cada escenario futuro de la subcuenca de Tinguiririca.	69
Tabla 5.9: Estimación consumo anual a partir de derechos consuntivos para la subcuenca de Cachapoal, en Mm3 al año.....	77
Tabla 5.10: Estimación consumo anual a partir de derechos consuntivos para la subcuenca de Tinguiririca, en Mm3 al año.....	77
Tabla 5.11: Estimación consumo mensual a partir de derechos consuntivos para la subcuenca de Tinguiririca, en Mm3 al mes.....	78
Tabla 5.12: Estimación consumo mensual a partir de derechos consuntivos para la subcuenca de Tinguiririca, en Mm3 al mes.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Clasificación de los modelos hidrológicos según resolución espacial y complejidad de los procesos. Los números representan modelos hidrológicos: 1-Hidrograma unitario, 2-HBV, 3-SUPERFLEX, 4-FLEX-TOPO, 5-MHM, 6-MHM-TOPO, 7-SWAT, 8-NWS, 9- GR4J, 10-HYPE, 11-VIC, 12- TOPMODEL, 13- CRHM, 14- TACD, 15- WASIM-ETH, 16- DHSVM, 17- MIKE-SHE, 18- PARFLOW, 19- CATFLO, 20- HYDRUS-3D, 21- CATHY y 22- HydroGeoSphere. Fuente: Hrachowitz & Clark (2017).....	4
Figura 2.2: Representación del Modelo VIC. Fuente: https://vic.readthedocs.io/en/master/Overview/ModelOverview/	6
Figura 2.3: Representación del cálculo de la evaporación desde suelos desnudos. Fuente: Liang et al. (1994).	10
Figura 2.4: Diagrama esquemático del transporte de nanoparticulas en la estructura de la planta de una sandía. Fuente: Wang et al., (2013).....	12
Figura 2.5: Gráfico evolución de la resistencia estomática mínima en el Aloe vera durante un periodo de 24 hrs. (7/11/2003). Las técnicas de cultivo y modos de riego son: T1 (acolchado plástico sin	

déficit hídrico), T2 (acolchado plástico con déficit hídrico), T3 (sombra sin déficit hídrico), T4 (sombra con déficit hídrico), T5 (sin cobertura plástica ni déficit hídrico) y T6 (sin cobertura plástica con déficit hídrico). Fuente: (Gil-Marín et al., 2006).	13
Figura 2.6: Relación rugosidad (Ro) y desplazamiento (d) de árboles. Fuente: Stull, R. B. (1999).	14
Figura 2.7: Representación de los parámetros Root_depth y Root_fraction en cada capa.	15
Figura 2.8: Ejemplo Imagen satelital Landsat 8- índice NDVI para la zona de la cuenca del río Rapel (Fecha: 2/02/2018).	16
Figura 2.9: (a) Emisiones de CO2 acumuladas para el periodo 2012-2100. Fuente: IPCC (2013) página 25, Cuadro RRP.3. (b) Cambio de temperatura de los escenarios climáticos. Fuente: IPCC (2013) página 19, figura RRP.7	17
Figura 3.1: Identificación zona de estudio. Se exponen los ríos y las cotas de terreno. Fuente DEM: ASF DAAC (2019); © JAXA/METI 2011.....	18
Figura 3.2: División comunal de la zona de estudio. Fuente: División político-administrativa (IDE-Chile, Infraestructura de datos geoespaciales de Chile, del Ministerio de Obras Nacionales).....	19
Figura 3.3: Precipitación y temperatura media mensual (1979-2016) para ambas subcuencas. Fuente: Datos CR2MET adquiridos desde CAMELS-CL (Álvarez Garreton et al., 2018).....	20
Figura 3.4: Uso de suelo de la Cuenca del Rapel. Fuente: (Zhao et al., 2016).....	21
Figura 3.5: Porcentaje de la clasificación (Nivel I) del Censo Agropecuario y Forestal 2007, para la cuenca de Rapel.....	22
Figura 3.6: Identificación de los catastros en el área de cultivo de Zhao et al. (2016). Fuente catastro frutícola: Odepa, creado por CIREN. Fuente Catastro hortícola: Sistema de Monitoreo hortícola (stmhor) creado por CIREN.	25
Figura 4.1: Diagrama de mejora del caso base (CB) al caso base catastrado (CBC).	27
Figura 4.2: En (A) Se presenta el cálculo del NDVI de la imagen Landsat 8 con fecha 18/05/2018. En (B) se presenta el catastro de vid de mesa del catastro frutícola 2018.....	31
Figura 4.3: Diagrama sobre metodología de análisis de respuesta hidrológica.	34
Figura 4.4: Diagrama definición escenarios futuros.	38
Figura 5.1 Parámetros estimados según imágenes satelitales Landsat 8 – Hortalizas y Anuales.....	40
Figura 5.2 Parámetros estimados según imágenes satelitales Landsat 8 - Frutales y viñedos.....	41
Figura 5.3: 4: Índice de sensibilidad DELSA (Rakovec et al., 2013) aplicado en los parámetros vegetaciones del modelo VIC.	48
Figura 5.4: Sensibilidad en la demanda evapotranspirativa de los parámetros LAI y Rmin.....	49
Figura 5.5: Variación anual de las variables P, E, ET y DE – Balance a nivel de celda correspondiente al promedio entre celdas factibles a cultivar.	50
Figura 5.6: Cociente entre demanda evapotranspirativa y escorrentía. Valores anuales para el set de 40 cultivos.	51
Figura 5.7: Demanda evapotranspirativa /Precipitación. Valores acumulados anuales para el set de 40 cultivos.	51
Figura 5.8: (A) Cambio en la demanda evapotranspirativa para la situación futura con respecto a la histórica. (B) Cambio en la escorrentía para la situación futura con respecto a la histórica.....	52
Figura 5.9: Demanda evapotranspirativa en (A) y escorrentía anual en (B) de los 40 cultivos estudiados.	53
Figura 5.10: En (A) el índice de aridez (P/PET) y en (B) la fracción de la demanda evapotranpirativa sobre la escorrentía (DE/E), para los 40 cultivos estudiados.	54
Figura 5.11: Demanda evapotranspirativa anual por celda en periodo histórico (paleta de color amarillo-verde) y el cambio en el periodo futuro con respecto al valor histórico, para los cuatros GCMs (en rojo los aumentos y en azul las reducciones).	56

Figura 5.12: Ubicación óptima para el periodo histórico como para los cuatro GCMs del periodo futuro. En verde se indican las celdas óptimas, en rojo las celdas que dejan de ser óptimas en el futuro y en azul, las que se vuelven óptimas en el futuro.	57
Figura 5.13: Análisis de la relación ET y PET en el modelo VIC.	58
Figura 5.14: Ubicación óptima hortalizas y anuales - Periodo futuro (2015-2059), zona común de los cuatro GCMs.	62
Figura 5.15: Ubicación óptima frutales y viñedos- Periodo futuro (2015-2059), zona común de los cuatro GCMs.	63
Figura 5.16: Mapa que muestra la pendiente del terreno de la zona de estudio. La pendiente es calculada en grados. Fuente: ASF DAAC 2014; Incluye material de © JAXA/METI 2007.	64
Figura 5.17: Para cada subcuenca se presenta en (A) la climatología , en (B) el cambio en el periodo (2015-2039) con respecto al periodo histórico y en (C) el cambio en el periodo (2040-2059) con respecto al promedio del periodo histórico. La sombra representa los valores de cada año del periodo respectivo.	71
Figura 5.18: Volumen de escorrentía (en Mm ³), en cada periodo. Y en el interior de las barras se presenta el porcentaje de cambio la escorrentía futura respecto al periodo histórico (1985-2015).	73
Figura 5.19: Demanda evapotranspirativa futura acumulada mensual para cada escenario. Donde en línea continua se representa el valor promedio en el periodo (2015-2039) y como punto se presenta el valor promedio en el periodo (2040-2059).	74
Figura 5.20: Demanda evapotranspirativa de cada escenario futuro de la subcuenca Cachapoal.	75
Figura 5.21: Demanda evapotranspirativa de cada escenario futuro de la subcuenca Tinguiririca.	76
Figura 5.22: Balance entre escorrentía disponible y demanda hídrica total superficial para la cuenca del Cachapoal.	80
Figura 5.23: Balance entre escorrentía disponible y demanda hídrica total superficial para la cuenca del Tinguiririca.	81

1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

En la publicación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2013) se ratificó que el cambio climático es inequívoco, y desde la década de 1950 muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios, la atmósfera y el océano se han calentado, la nieve y glaciares han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado. En Chile Central, el efecto se verá reflejado en aumento de la temperatura y disminución de la precipitación (INFODEP, 2016). Por esto, con urgencia es crucial determinar los caudales futuros, considerando forzantes meteorológicas definidas de acuerdo con los escenarios de cambio climático.

Según Mao & Cherkauer (2009) “la cobertura del suelo desempeña un papel importante al influir en el equilibrio del agua y la energía en la superficie terrestre, a través de su efecto sobre la transpiración, interceptación y evaporación de las hojas del dosel”. Por su parte, las propiedades físicas del suelo tienen influencia en la respuesta hidrológica (Dunn & Mackey, 1995), como también, las alteraciones en la cubierta vegetal pueden influir en propiedades como la rugosidad de la superficie terrestre o el índice del área foliar, entre otros, que pueden generar cambios en el balance de energía superficial y la evapotranspiración (Pielke & Avissar, 1990; Greene et al., 1999).

El cambio de uso de suelo puede afectar la frecuencia de inundaciones, las pérdidas por evaporación a la atmósfera, el contenido de humedad del suelo, la escorrentía y los patrones del flujo base (Mao & Cherkauer, 2009). En particular, en Marhaento et al. (2018) se estudia la respuesta hidrológica frente a uso de suelo futuro y cambio climático en una cuenca tropical, donde concluyen que estas modificaciones uso de suelo pueden resultar en cambios en las componentes del balance hídrico, siendo esto más pronunciado al estudiar el efecto combinado de ambos.

Por su parte, los modelos hidrológicos, según Hrachowitz & Clark (2017) “se utilizan para predecir inundaciones, sequías, recarga de aguas subterráneas e intercambio tierra-atmósfera, y son de importancia crítica como herramientas para el desarrollo de estrategias de planificación y gestión de recursos hídricos. Lo cual es particularmente cierto a la luz de los crecientes efectos del clima y cambio del uso de la tierra en el ciclo del agua terrestre.”

Frente a esto, es de utilidad la aplicación de la modelación hidrológica, considerando el cambio climático y uso de suelo, de modo de identificar patrones de cubierta vegetal indicados para un manejo adecuado de los recursos hídricos. Por lo cual, la modelación hidrológica es una herramienta que permite estimar el efecto que puede tener el uso de suelo como medida de mitigación.

De acuerdo con el aumento de población esperado para el futuro cercano, se hace necesario conocer el efecto en la hidrología en cuencas de importancia agrícola, de modo de conocer su demanda hídrica futura asociada a riego y el efecto en el flujo de la escorrentía local.

Dado que la Cuenca del Río Rapel se constituye como una zona donde la actividad agrícola es de gran importancia, es necesario analizar medidas de adaptación a las nuevas condiciones de limitación de recurso hídrico, dadas por el cambio climático. Y de este modo desarrollar una agricultura sustentable. Según el Atlas del agua (MOP, 2016) la cuenca pertenece a la macrozona centro que incluye las regiones de Valparaíso, Metropolitana de Santiago, Libertador General Bernardo O’Higgins y del Maule, y posee

un clima mediterráneo con precipitaciones moderadas, siendo el promedio anual de 943 mm/año, las que se concentran en invierno; cuenta con una estación seca prolongada de 7 a 8 meses; presentando una escorrentía media anual de 1.116 m³/s, lo que corresponde a 3,8% del total nacional. Esta macrozona posee uno de los suelos más fértiles de Chile y debido a la abundancia de agua producto de los deshielos, lo que ha conducido a la producción de una gran variedad de frutas y hortalizas, mayoritariamente para exportación (MOP, 2016).

Según Bozkurt et al. (2018), considerando el escenario de mayor emisión de dióxido de carbono, es decir, RCP8.5, se espera una reducción de la precipitación, cuyos valores medios son: 10% para el 2040, 18% para el 2070 y 30% para el 2100, con respecto al periodo histórico. Mientras que la escorrentía presentaría una reducción de 18% para el 2040, 22% para el 2070 y 40% para el 2100.

En este contexto, este trabajo se basa en el análisis de las componentes hidrológicas en base a cambio de uso de suelo agrícola y cambio climático, para ello se aplica el modelo hidrológico distribuido VIC (Variable Infiltration Capacity; Liang et al., 1994), en las subcuencas del río Tinguiririca y río Cachapoal. Luego, para llevar a cabo la serie de simulaciones se utiliza el supercomputador Leftraru del Centro de Modelamiento Matemático (CMM) de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, de la Universidad de Chile. Y se considera el trabajo base realizado por el proyecto “Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las cuencas de las macrozonas Norte y Centro” (DGA, 2018)

1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal corresponde al análisis de las modificaciones en los componentes del ciclo hidrológico en la Cuenca del Río Rapel, asociados a cambios de uso de suelo para el escenario de cambio climático RCP 8.5.

Los objetivos específicos se muestran a continuación:

- Proponer escenarios de cultivos futuros acordes a las características climáticas futuras y la disponibilidad hídrica proyectada.
- Evaluar las respuestas de los procesos hidrológicos frente a escenarios de cambio de uso de suelo.
- Recomendar modificaciones al uso de suelo.

1.3 ORGANIZACIÓN DEL INFORME

Este trabajo se inicia con el Capítulo 2 donde se aborda la revisión bibliográfica necesaria para el desarrollo de este trabajo; en el Capítulo 3 se expone la caracterización de la zona de estudio y se presenta la información disponible para la zona; en el Capítulo 4 se describe la metodología utilizada para satisfacer los objetivos planteados; los resultados obtenidos se exponen y analizan en el Capítulo 6; finalmente en el Capítulo 7 se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas de este estudio.

2 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

2.1 MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Los modelos hidrológicos apuntan a la comprensión del ciclo hidrológico, por lo que buscan representar los procesos que ocurren entre tierra-vegetación-atmósfera (Hrachowitz & Clark, 2017), a partir de

expresiones analíticas que definen las relaciones entre los flujos de entradas y salida. Algunos ejemplos de “entradas” son: la precipitación, nieve, escorrentías superficial y subterránea, mientras que como flujos de “salida” se tiene la evapotranspiración, la acumulación y derretimiento de nieve, la infiltración y las escorrentías subterráneas y superficial, entre otros.

Por ello, se requieren set de datos temporales para las forzantes meteorológicas y condiciones iniciales, dadas por parámetros que permiten representar las características del suelo y la vegetación del área de estudio. Con ello, frente a la dificultad de disponer de dicha información, y a la incerteza generada en cada etapa, los modelos hidrológicos se caracterizan principalmente por el nivel de complejidad en la definición de sus procesos y la resolución espacial que posee (Hrachowitz & Clark, 2017). Los modelos hidrológicos se clasifican comúnmente de acuerdo con los siguientes aspectos:

1. Simplificación espacial: modelo distribuido espacialmente o modelo agrupado.
2. Simplificación del sistema: modelo de base física o conceptual.
3. Arquitectura del modelo: modelos continuos o basados en tanques.
4. Estrategias de refinamiento/escala del modelo: estrategia de arriba hacia abajo o de abajo hacia arriba.

Los modelos distribuidos espacialmente (“spatially distributed”, en inglés) proporcionan representaciones explícitas de la heterogeneidad natural de la zona. Esto se logra de tres maneras: (1) distribución espacial de la cantidad de humedad, es decir, cada unidad del modelo es representada por un mismo parámetro, pero el modelo es forzado con entradas espacialmente variables (como, la precipitación, temperatura, etc.); (2) Parámetros espacialmente distribuidos, que representan la heterogeneidad dadas por las condiciones de borde del sistema natural; y (3) una combinación de ambas. Por su parte, los modelos agrupados (“lumped”, en inglés) representan el modelo como una única identidad sin discretización espacial (Hrachowitz & Clark, 2017).

Los modelos de base física (“physically-based”, en inglés) entregan una descripción del sistema de flujo en la columna de suelo porosa y heterogénea, y en la interfaz tierra-vegetación-atmósfera, para lo cual, se consideran relaciones funcionales entre estados y flujos. Mientras que los modelos conceptuales proporcionan una descripción a nivel macroescala del sistema hidrológico, por lo que no integra la complejidad del proceso interno del sistema. (Hrachowitz & Clark, 2017).

Los modelos continuos (“continuum-based”, en inglés) se desarrollan a nivel microescala, donde las ecuaciones representan los flujos que se definen en función de gradientes espaciales, por ello se dice que son modelos distribuidos espacialmente de manera inherente. Mientras que los modelos basados en tanques (“bucket-based”, en inglés) se basan en elementos conceptuales de almacenamiento, llamados “tanques o cubos”, que representan el almacenamiento a escalas mayores, y la transmisión del agua se ve representada como funciones que conectan los tanques (Hrachowitz & Clark, 2017).

La estrategia de escala ascendente (“bottom-up”, en inglés) comprende estimar los flujos a gran escala a partir de la agregación de las salidas de las unidades del modelo a pequeña escala, a lo largo de sus respectivas direcciones de drenaje. Mientras que el enfoque de escala descendente (“top-down”, en inglés) comprende una estrategia de mejora, que se basa en comprender y probar diferentes modelos como hipótesis del funcionamiento del sistema que permitan interpretar los patrones observados a macroescala (Hrachowitz & Clark, 2017).

En la Figura 2.1 se presenta la clasificación de varios modelos hidrológicos según resolución espacial y complejidad en la representación de los procesos del sistema.

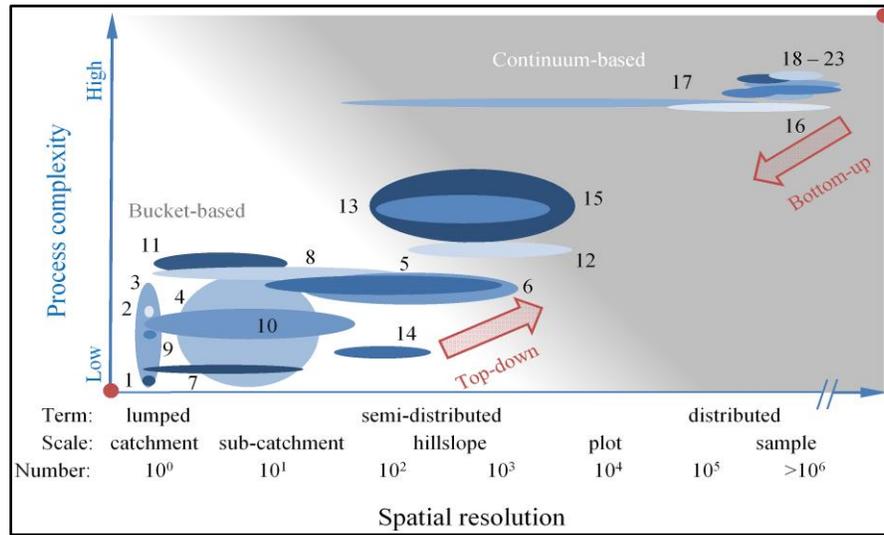


Figura 2.1: Clasificación de los modelos hidrológicos según resolución espacial y complejidad de los procesos. Los números representan modelos hidrológicos: 1-Hidrograma unitario, 2-HBV, 3-SUPERFLEX, 4-FLEX-TOPO, 5-MHM, 6-MHM-TOPO, 7-SWAT, 8-NWS, 9- GR4J, 10- HYPE, 11-VIC, 12- TOPMODEL, 13- CRHM, 14- TACD, 15- WASIM-ETH, 16- DHSVM, 17- MIKE-SHE, 18-PARFLOW, 19- CATFLO, 20- HYDRUS-3D, 21- CATHY y 22- HydroGeoSphere. Fuente: Hrachowitz & Clark (2017).

2.2 MODELO HIDROLÓGICO VIC

El modelo VIC (Variable Infiltration Capacity; Liang et al., 1994) corresponde a un modelo hidrológico distribuido, el cual resuelve balances de masa y de energía. Fue desarrollado por Xu Liang en la Universidad de Washington y ha sido aplicado en varias cuencas. Ejemplos de esto, son los estudios de cambio de uso de suelo y/o cambio climático desarrollado en: río Qingyi en China (Liu et al., 2013), río Yellow en China (Cuo et al., 2013), río Liaohe en China (Yang et al., 2014), río Mahanadi de India (Dadhwal et al., 2010), río Ashti de India (Hengade & Eldho, 2016), río Rhine de India (Hurkmans et al., 2009), río Pennar de India (Garg et al., 2017) y en tres lagos de la zona “The Great Lakes” (Minnesota, Wisconsin, y Michigan) de Estados Unidos y Canadá (Mao & Cherkauer, 2009), entre otros.

La unidad de trabajo es la celda, una superficie cuadrada, definida generalmente según la resolución espacial de las forzantes meteorológicas. Cada celda o píxel puede contener varias clases de coberturas n . Para cada tipo de cobertura de suelo n , se ingresan parámetros para caracterizar dicha clase, entre los que se encuentran: el índice de área foliar, la resistencia del follaje, la distribución de raíces en las distintas capas de suelo, entre otras. Luego, en términos de balance, tanto las entradas como los flujos de salida son calculados por celda.

En este modelo, es posible identificar distribución espacial de dos tipos. La primera, comprende a la celda como una unidad que contienen parámetros homogéneos, pero que varían espacialmente entre celdas, lo cual ocurre con las entradas de forzantes meteorológicas. El segundo tipo de distribución corresponde a la variación de parámetros dentro de una misma celda, que permiten dar cuenta de la

heterogeneidad de ésta, lo cual ocurre con la definición de clases de cultivos por celda y el conjunto de parámetros que define a dichas clases.

Las forzantes meteorológicas (precipitación, temperatura, radiación, etc.), los flujos de atmósfera terrestre, los balances hídricos y de energía, se definen según series de tiempos dados por el modelador, en base a la información disponible.

2.2.1 Generalidades

Los datos y parámetros de entrada del modelo son los siguientes:

- Forzantes meteorológicas: precipitación, temperatura del aire, velocidad del viento y humedad relativa.
- Bandas de Nieve.
- Parámetros del suelo, tales como: profundidad de las capas de suelo, conductividad hidráulica, contenido de humedad inicial, entre otras.

2.2.2 Parámetros de entrada no vegetacionales

2.2.3 Balance de masa

El modelo hidrológico resuelve el balance por celda, a la cual ingresan entradas y se obtienen salidas. La modelación se realiza con tres capas de suelo y en celdas de $0,05^\circ$ grados (Sistema WGS84). En la Figura 2.2 se esquematizan los procesos de evaporación desde suelo desnudo (E), evaporación de agua interceptada en el follaje (E_C), transpiración (E_t), precipitación (P), escorrentía producto de la precipitación en exceso (R), flujo base (B) y el traspaso de agua entre las distintas capas del suelo (Q). Además, se muestra la representación de los usos de suelo en cada celda (con n clases posibles a disponer en la celda y $n+1$ representa el suelo desnudo).

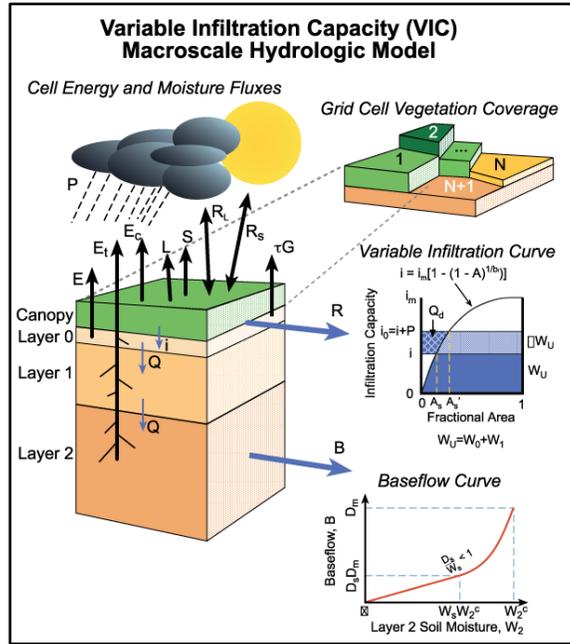


Figura 2.2: Representación del Modelo VIC. Fuente:
<https://vic.readthedocs.io/en/master/Overview/ModelOverview/>

Balance hídrico en el modelo VIC, cumple la Ecuación 2.1 para cada lapso de tiempo.

$$\frac{dS}{dt} = P - E - ET \quad (2.1)$$

Donde $\frac{dS}{dt}$, P, E y ET, son el cambio en el almacenamiento, la precipitación, escorrentía total, y la evapotranspiración, respectivamente, para el lapso de tiempo dt . Luego en áreas con vegetación, el balance de agua para la interceptación es:

$$\frac{dW_i[n]}{dt} = P - Evap_{Canopy}[n] - P_t[n] \quad ; \text{ para } 0 \leq W_i[n] \leq W_{im}[n] \quad (2.2)$$

Dado la clase de vegetación n , $W_i[n]$ es la cantidad de agua interceptada en la superficie vegetal, $W_{im}[n]$ es la máxima cantidad de agua que puede ser interceptada en la superficie vegetal, $Evap_{Canopy}[n]$ es la evaporación desde el follaje y $P_t[n]$ es el exceso de precipitación que ocurre cuando se excede $W_{im}[n]$.

La máxima cantidad de agua que puede interceptar la superficie vegetal se define según la Ecuación 2.3.

$$W_{im}[n] = K_L \cdot LAI \quad (2.3)$$

Donde, K_L es una constante que toma el valor de 0,2 mm según Dickinson (1984).

Por su parte, la evapotranspiración (ET) en el modelo VIC corresponde a la estimación del valor de la evapotranspiración real, lo cual comprende un valor medido. La ET en el modelo, corresponde a las sumatoria de tres componentes los cuales se expresen en la Ecuación 2.4, considerando una resistencia nula en el dosel.

$$ET = Evap_{Canopy} + Evap_{Trans_veg} + Evap_{Bare} \quad (2.4)$$

Donde:

$Evap_{Canopy}$: Evaporación desde el follaje debido a la intercepción de precipitación.

$Evap_{Trans_veg}$: Transpiración de la vegetación

$Evap_{Bare}$: Evaporación desde el suelo desnudo.

Cada uno de estos componentes, se define en función de Ep , que corresponde a la evapotranspiración potencial según Penman-Monteith. La Ep se construye a partir de elementos meteorológicos, tales como: radiación solar neta, temperatura del aire, velocidad del viento y presión de vapor, lo cual se representa con la Ecuación 2.5.

$$Ep = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot U_2 \cdot (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (2.5)$$

Donde:

- Ep : Evapotranspiración potencial [mm/d]
- R_n : Radiación neta en la superficie de la planta [MJ/m²d]
- G : Flujo térmico del suelo [MJ/m²d]
- T : Temperatura media [°C]
- U_2 : Velocidad del viento medida a 2 m de altura [m/s]
- $(e_a - e_d)$: Déficit de la Presión de Vapor [KPa]
- e_a : Presión de vapor saturado a la temperatura del aire [KPa]
- e_d : Presión real de vapor [KPa]
- Δ : Pendiente de la Curva de presión de Vapor [KPa/°C]
- γ : Constante psicrométrica [KPa/°C]

Las componentes de la ET se definen a continuación:

a) La evaporación desde el follaje ($Evap_{Canopy}$), se define de acuerdo con la Ecuación 2.6:

$$Evap_{Canopy}[n] = \left(\frac{W_i[n]}{W_{im}[n]} \right)^{2/3} \cdot E_p[n] \cdot \frac{r_w[n]}{r_w[n] + r_0[n]} \quad (2.6)$$

Donde n representa a la clase de uso de suelo, $W_i[n]$ es el agua interceptada por el follaje, $W_{im}[n]$ es la máxima cantidad de agua que el follaje puede interceptar; $E_p[n]$ es la evaporación potencial según Penman-Monteith; $r_0[n]$ es la resistencia debido a la variación del gradiente de humedad específica entre las hojas y el aire sobre el follaje; $r_w[n]$ es la resistencia aerodinámica producto de la transferencia de agua.

La resistencia aerodinámica de la transferencia de agua se calcula según la Ecuación 2.7:

$$r_w[n] = \frac{1}{C_w[n]u_n(z_2)} \quad (2.7)$$

Con $u_n(z_2)$ el viento en el uso de suelo n a una altura z_2 y C_w el coeficiente de transferencia de agua, que se estima considerando la estabilidad atmosférica según la Ecuación 2.8 y 2.9:

$$C_w[n] = 1,351 \cdot a^2[n] \cdot F_w[n] \quad (2.8)$$

$$a^2[n] = \frac{K^2}{\left[\ln \left(\frac{z_2[n] - d_0[n]}{z_0[n]} \right) \right]^2} \quad (2.9)$$

Donde a es el coeficiente de arrastre para el caso de una estabilidad semi-neutra, K es la constante de Von Karman (igual a 0,4), $d_0[n]$ es la altura de desplazamiento plano y z_0 es la rugosidad. $F_w[n]$ se define de acuerdo con la Ecuación 2.10, definida según el número de Richardson.

$$F_w[n] = 1 - \frac{9,4Ri_B[n]}{1 + c \cdot |Ri_B[n]|^{\frac{1}{2}}} \quad ; Ri_B[n] < 0 \quad (2.10)$$

$$F_w[n] = \frac{9,4Ri_B[n]}{(1 + 4,7 \cdot Ri_B[n])^2} \quad ; 0 \leq Ri_B[n] \leq 0,2$$

El valor c según la Ecuación 2.11:

$$c = 49,82 \cdot a^2[n] \cdot \left(\frac{z_2[n] - d_0[n]}{z_0[n]} \right)^{1/2} \quad (2.11)$$

b) La transpiración de la planta ($Evap_{Trans_veg}$ o E_t) se estima según la Ecuación 2.12 :

$$Evap_{Trans_veg}[n] = \left[1 - \left(\frac{W_i[n]}{W_{im}[n]} \right)^2 \right] \cdot E_p \cdot \frac{r_w[n]}{r_w[n] + r_0[n] + r_c[n]} \quad (2.12)$$

Donde $r_c[n]$ es la resistencia estomática o del follaje, dada por la Ecuación 2.13:

$$r_c[n] = \frac{r_{0c}[n]g_{sm}[n]}{LAI[n,m]} \quad (2.13)$$

Donde $r_{0c}[n]$ corresponde a la resistencia mínima del estomática y $g_{sm}[n]$ es un factor que representa el estrés debido a la humedad del suelo y que depende de la cantidad de agua disponible en la capa de raíces, el cual se define en la Ecuación 2.14:

$$(i) \quad g_{sm}^{-1} = 1 \quad ; W_j \geq W_j^{cr}$$

$$(ii) \quad g_{sm}^{-1} = \frac{W_j[n] - W_j^w}{W_j^{cr} - W_j^w} \quad ; W_j^w \leq W_j[n] \leq W_j^{cr} \quad (2.14)$$

$$(iii) \quad g_{sm}^{-1} = 0 \quad ; W_j[n] < W_j^w$$

Donde $W_j[n]$ es la humedad del suelo en la capa j , $j = \{1,2,3\}$, W_j^{cr} es la humedad crítica tal que si la humedad es mayor la $Evap_{Trans.veg}$ no se ve afectada por el estrés hídrico, esto debido a que marca un estado de transición bajo el cual el estado de humedad del suelo se vuelve insaturado. W_j^w corresponde al punto de marchitez, que es donde la humedad del suelo es equivalente a la capacidad de campo. El agua puede extraerse desde las capas del suelo según la proporción de raíces ($f_j[n]$) que cada capa tenga.

No se considera estrés, es decir, $g_{sm}[n] = 1$, si ocurre:

- (i) $W_2[n]$ es mayor o igual a W_2^{cr} y $f_2[n] > 0,5$
- (ii) $W_1[n]$ es mayor o igual a W_1^{cr} y $f_1[n] > 0,5$

En caso de que ocurra (i), la transpiración es alimentada desde la segunda capa, es decir, $E_t[n] = E_2^t[n]$ (sin importar la cantidad de agua que tiene la capa 1). En cambio, si ocurre (ii) la transpiración toma agua desde la capa 1, es decir, $E_t[n] = E_1^t[n]$.

De manera compuesta, la transpiración se forma según los aportes de cada capa, como se muestra en la Ecuación 2.15:

$$E_t[n] = f_1[n] \cdot E_1^t[n] + f_2[n] \cdot E_2^t[n] \quad (2.15)$$

Donde $E_1^t[n]$ y $E_2^t[n]$ son la transpiración desde las capas 1 y 2 respectivamente.

En caso de que ocurra un evento de precipitación con una intensidad menor a la tasa de evaporación desde el follaje, ésta se debe considerar para alimentar la demanda en cada lapso de tiempo. En este caso, la evaporación desde el follaje ($E_c[n]$) se define por la Ecuación 2.16:

$$E_c[n] = f[n] \cdot E_c^*[n] \quad (2.16)$$

Donde $f[n]$ es la fracción de tiempo requerido para que la evaporación desde el follaje consuma toda el agua interceptada, y está dada por la Ecuación 2.17:

$$f[n] = \min \left(1, \frac{W_t[n] + P \cdot \Delta t}{E_c^*[n] \cdot \Delta t} \right) \quad (2.17)$$

Donde P es la tasa de precipitación y Δt es el paso de tiempo. Luego, la transpiración durante el paso de tiempo se obtiene según la Ecuación 2.18:

$$E_t[n] = (1 - f[n]) \cdot E_p[n] \cdot \frac{r_w[n]}{r_w[n] + r_0[n] + r_c[n]} + f[n] \left[1 - \left(\frac{W_i[n]}{W_{im}[n]} \right)^{\frac{2}{3}} \right] E_p[n] \frac{r_w[n]}{r_w[n] + r_0[n] + r_c[n]} \quad (2.18)$$

c) La evaporación desde el suelo desnudo ($Evap_{Bare}$) extrae agua solamente desde la primera capa de suelo. Cuando la primera capa está saturada, la evaporación es igual a la evaporación potencial $E_p[n + 1]$, donde $n + 1$ hace referencia al número de clase que identifica el suelo desnudo. En consecuencia, se tiene $E_1 = E_p[n + 1]$. Cuando la primera capa no está saturada, la tasa de evaporación E_1 varía dentro del área desnuda debido a la heterogeneidad en infiltración, topografía y características del suelo. En este caso, E_1 se calcula considerando que la capacidad de infiltración varía dentro de un área según la Ecuación 2.19:

$$i = i_m [1 - (1 - A)^{1/b_i}] \quad (2.19)$$

Donde i corresponden a la capacidad de infiltración, i_m la capacidad máxima de infiltración, A es la fracción de área donde la infiltración es menor a la tasa i y b_i es un parámetro de forma. Si A_s es el área que se encuentra saturada e i_0 la tasa de infiltración de dicha área, entonces la tasa de infiltración E_1 se obtiene según la Ecuación 20:

$$E_1 = E_p[n + 1] \left[\int_0^{A_s} dA + \int_{A_s}^1 \frac{i_0}{i_m (1 - (1 - A))^{1/b_i}} dA \right] \quad (2.20)$$

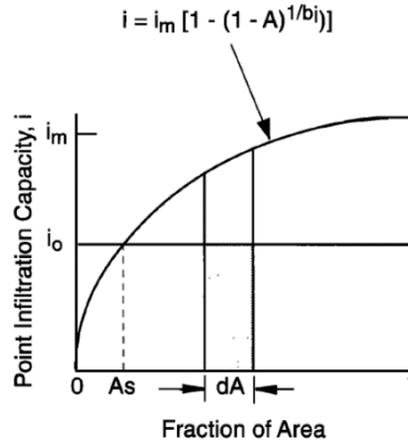


Figura 2.3: Representación del cálculo de la evaporación desde suelos desnudos. Fuente: Liang et al. (1994).

Como no existe una expresión analítica para la segunda integral, ésta se debe estimar mediante una expansión de series, tal como se muestra en la Ecuación 2.21:

$$E_1 = E_p[N + 1] \left\{ A_s + \frac{i_0}{i_m} (1 - A_s) \left[1 + \frac{b_i}{1 + b_i} (1 - A_s)^{1/b_i} + \frac{b_i}{2 + b_i} (1 - A_s)^{2/b_i} + \frac{b_i}{3 + b_i} (1 - A_s)^{3/b_i} + \dots \right] \right\} \quad (2.21)$$

Por otra parte, se define la evapotranspiración potencial (*PET*), como la evapotranspiración del paisaje actual que ocurre en ausencia de limitaciones de humedad del suelo, déficit de presión de vapor, temperatura o insolación. En el modelo VIC este valor corresponde a la “salida” denominada *PET_NATVEG* (para las versiones 4.1 y 4.2 de VIC y *PET* para la versión 5). La cual es calcula con las ecuaciones que definen a la *ET*, pero considerando que se representa el paisaje actual, por lo que se toma el valor de resistencia del dosel y *LAI* propios de la clase de cultivo *n*. Además, como no se consideran limitaciones hídricas, la *PET* queda definida por un factor de estrés hídrico igual a 1 (ver Ecuación 2.14 y 2.15).

2.2.4 Definición de parámetros vegetacionales

Los parámetros vegetacionales son estudiados en este trabajo con el fin de caracterizar cada clase de cultivo e incorporar en el modelo un uso de suelo agrícola que permita reproducir los cultivos presentes en la zona. Estos parámetros en el modelo VIC son propios para cada clase de cultivo *n* y se presentan en la Tabla 2.1, los cuales puede ser un valor único o valores mensuales:

Tabla 2.1: Parámetros vegetacionales del modelo VIC.

Sigla	Nombre	Unidad	Número de valores
<i>Rarc</i>	Resistencia arquitectónica	s/m	1
<i>Rmin</i>	Resistencia mínima estomática	s/m	1
<i>LAI</i>	Índice de área foliar	-	12
<i>Albedo</i>	Albedo de onda corta	-	12
<i>Ro</i>	Largo de rugosidad	m	12
<i>d</i>	Altura de desplazamiento	m	12
<i>RGL</i>	Mínima radiación entrante de onda corta en la que habrá transpiración	W/m ²	1
<i>Rad_atten</i>	Factor de atenuación de la radiación	-	1
<i>Wind_atten</i>	Factor de atenuación del viento	-	1
<i>Trunk_atten</i>	Proporción de la altura total del árbol que es el tronco (sin ramas)	-	1
<i>Root_depth</i>	Profundidad de la zona de la raíz (la suma de las profundidades es la profundidad total de la penetración de la raíz).	m	1
<i>Root_fraction</i>	Fracción de raíz de cada capa.	-	1

Las plantas presentan poros o cutículas que forman estructuras especializadas denominadas “estomas” y a partir de estas estructuras se libera agua desde la planta hacia la atmósfera. Los estomas están presentes en la epidermis de casi todas partes aéreas de la planta (hojas, tallo, flores, frutos e incluso raíces en algunas especies). Los estomas cumplen la función de incorporar CO₂ y a la vez retener el agua, es por ello que la planta presenta resistencia hacia la pérdida de agua. Esta resistencia se materializa en los dos parámetros vegetacionales del modelo VIC: resistencia arquitectónica y resistencia estomática mínima.

La resistencia arquitectónica o del dosel (R_{arc}) para la clase de cultivo n se denomina $r_0[n]$ en las ecuaciones 2.6 y 2.12, las cuales son asociada a la evaporación desde el follaje y la transpiración, respectivamente. Este parámetro corresponde a la resistencia que presenta la planta frente al gradiente de humedad entre las hojas y el aire. Según Saugier & Katerji (1991) este valor se encuentra en torno a 2 [s/m]. En dicho estudio, se analizan varios cultivos, entre ellos, el kiwi que presenta un valor entre 1 y 2 [s/m] (McAneney and Judd, 1983) y en tubérculos, se tiene la papa con un valor de 1 a 3 [s/m] (Katerji et al., 1986).

Por su parte, la resistencia estomática mínima (R_{min}), corresponde al valor mínimo de la resistencia estomática registrado en el ciclo diario. La resistencia estomática se define según Dickinson et al. (1993) como la resistencia mecánica total presente en la difusión desde el interior de una hoja hacia el exterior. Esta resistencia de la planta permite mantener el vapor de agua saturado al interior de las hojas, de lo contrario las células mesofílicas de la hoja se secarían y la hoja se marchitaría. Esta difusión ocurre en toda la planta, no solo en los estomas, por ello también se conoce como resistencia foliar. Los estomas, son poros, que al estar abiertos son como conductos para el paso del agua transpirada. Por ello, la resistencia depende en gran medida del tamaño, la distribución y el grado de apertura de estos estomas. Sin embargo, también se produce difusión de agua a través de las cutículas de las hojas, incluso pueden ser la ruta principal para la transpiración cuando los estomas están cerrados (Dickinson et al., 1993).

En la Figura 2.4 se presenta el diagrama esquemático de la estructura de la hoja por donde se produce el transporte, identificándose los estomas y cutícula.

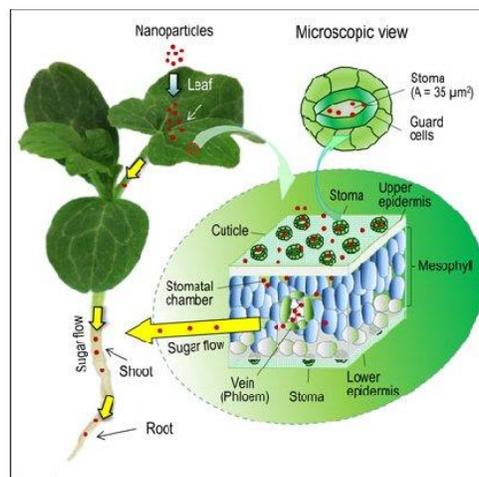


Figura 2.4: Diagrama esquemático del transporte de nanopartículas en la estructura de la planta de una sandía. Fuente: Wang et al., (2013).

La resistencia estomática presenta una variación en el ciclo diario, la cual es analizada en el estudio de Gil-Marín et al. (2006), donde se realizan mediciones de este parámetro en el cultivo de aloe vera, bajo diferentes técnicas de cultivo y modos de riego. En la Figura 2.5 se presentan los resultados obtenidos por Gil-Marín et al. (2006) para la planta de aloe vera, en el cual se consideran distintas técnicas de cultivo y modos de riego.

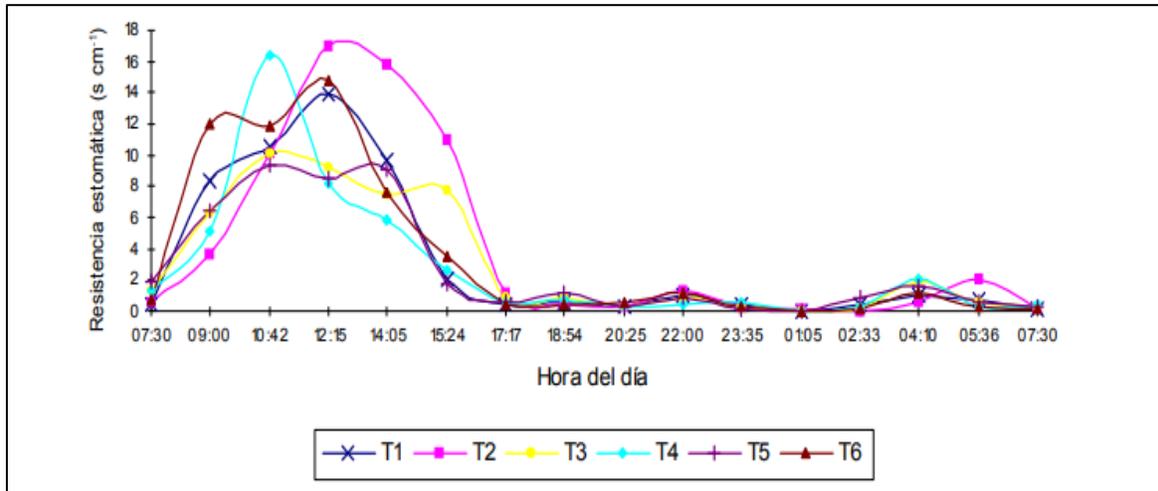


Figura 2.5: Gráfico evolución de la resistencia estomática mínima en el Aloe vera durante un periodo de 24 hrs. (7/11/2003). Las técnicas de cultivo y modos de riego son: T1 (acolchado plástico sin déficit hídrico), T2 (acolchado plástico con déficit hídrico), T3 (sombra sin déficit hídrico), T4 (sombra con déficit hídrico), T5 (sin cobertura plástica ni déficit hídrico) y T6 (sin cobertura plástica con déficit hídrico). Fuente: (Gil-Marín et al., 2006).

A partir de esto, se observan diferencias significativas en el registro diario de la resistencia estomática de una misma clase de cultivo, en este caso, el aloe vera. Además, se observa una disminución de la resistencia estomática con la temperatura nocturna, por el cierre de los estomas.

Según Dickinson et al. (1993) la resistencia estomática presenta variación frente a los siguientes factores: radiación, estacionalidad de la temperatura, humedad del suelo y déficit de presión de vapor. Por lo cual, para conocer el valor de R_{min} se debe tener un registro de la medición de la resistencia estomática bajo diferentes condiciones, de modo de estimar un rango posible para el valor de la resistencia estomática mínima observada en el ciclo diario, para cada clase de cultivo n .

Por su parte, el LAI corresponde al cociente entre el área de las hojas de una planta y el área del suelo sobre el cual se encuentra establecido. Este parámetro se encuentra presente en la definición de la evapotranspiración desde el follaje ($Evap_{canopy}$, ver Ecuación 2.6) y en la transpiración ($Evap_{Trans_{veg}}$, ver Ecuación 2.12 y 2.13). Para determinar el LAI existen métodos destructivos y no destructivos, dentro de los métodos no destructivos se encuentran las fotografías y las imágenes satelitales, que permiten estimar el valor de acuerdo con una proporción del desarrollo del árbol. En base a la utilización de imágenes satelitales, el LAI puede ser estimado según su relación con el índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

El índice NDVI representa un indicador del estado de la vegetación. En particular, la relación entre las bandas del infrarrojo cercano y el rojo (visible) es la que determina un indicador del estado de vigor o

pérdida de vitalidad de una planta (Manrique, 1999). Esto debido a que las plantas absorben radiación en el espectro visible, mientras que a la vez presentan alta reflectancia de la radiación infrarroja, esto último debido a que esta radiación infrarroja presenta un nivel de energía insuficiente para sintetizar moléculas orgánicas y su absorción solo generaría sobrecalentamiento y con ello daños a sus tejidos. De acuerdo con lo anterior, el índice NDVI se estima mediante álgebra de bandas de imágenes satelitales, mediante la Ecuación 2.22:

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (2.22)$$

Donde:

- *NIR*: Banda correspondiente al *infrarrojo* cercano
- *VIS*: Banda correspondiente al espectro visible.

Finalmente, Breuer et al. (2003) hizo una revisión de los valores de los parámetros de vegetación, en donde se indica un amplio rango de valores para los parámetros *Rmin* y *LAI*. Este rango no solo varía por el tipo de clase de vegetación, sino que también presentan variaciones para un mismo tipo de clase. Ejemplo de esto, son las diferencias significativas encontradas en el valor del *LAI* entre clases de vegetación similares observados en América del Norte y Europa.

Por otra parte, el *albedo* presenta un valor de 0 a 1 y corresponde a la proporción de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide en ella, dicha radiación incidente corresponde a la radiación de onda corta. Los cuerpos oscuros tienen un albedo bajo y los más claros tienen un valor cercano a 1. Para la estimación de los valores mensuales del *albedo* de una clase de cultivo *n*, es de utilidad las imágenes satelitales y el empleo de algún catastro de vegetación que cuente con información georreferenciada.

La rugosidad (*Ro*) y desplazamiento (*d*) son parámetros que afectan la aerodinámica y dependen de la altura del cultivo (*h*). La relación entre *d* y *Ro* se presenta en la Ecuación 2.23 y se ejemplifica en la Figura 2.6, donde *h* es la altura del cultivo.

$$h = Ro + d \quad (2.23)$$

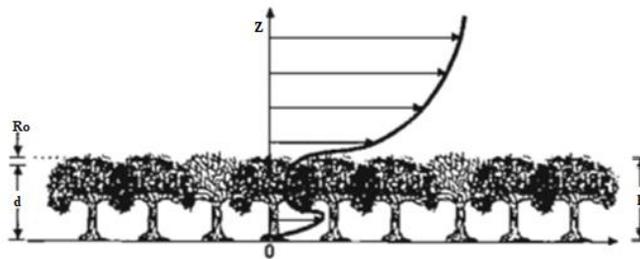


Figura 2.6: Relación rugosidad (*Ro*) y desplazamiento (*d*) de árboles. Fuente: Stull, R. B. (1999).

El *RGL* corresponde a la mínima radiación entrante de onda corta en la que habrá transpiración. Según Bower et al. (1977), en donde se estudia el palto en diferentes condiciones térmicas, el proceso de fotosíntesis se mantiene constante al llegar a una radiación de 200 [W/m²], variando dicho punto de estabilización entre 150 a 250. Sin embargo, para otros cultivos no se identifican estudios.

El factor de atenuación de la radiación (Rad_atten), pero debe ser ajustado si la cuenca se ubica en altas latitudes.

El parámetro $Trunk_atten$ se define como la fracción de la altura total del cultivo que corresponde al tronco libre de hojas.

Los parámetros $Root_depth$ y $Root_fraction$, definen la profundidad de raíz y la fracción de raíces presentes en cada capa, respectivamente. Ambos parámetros influyen en la cuantificación de la transpiración de la planta ($Evap_{Trans_veg}$, ver Ecuación 2.12).

En la Figura 2.7 se ejemplifican ambos parámetros, en donde $Root_depth$ sub- i representa la profundidad de la parte de la raíz contenida en la capa i . Mientras que $Root_fraction$ sub- i es la fracción de raíces que se tiene en la capa sub- i con respecto al total de raíces, es decir, la suma de $Root_fraction$ de todas las capas debe sumar 1 en cada celda para la clase n .

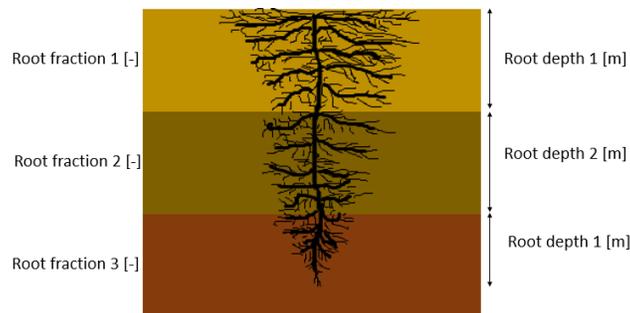


Figura 2.7: Representación de los parámetros $Root_depth$ y $Root_fraction$ en cada capa.

2.2.5 Utilización de imágenes satelitales Landsat 8 y el modelo de elevación ALOS PALSAR

Las imágenes satelitales corresponden a fotografías realizadas por satélites, que orbitan alrededor de la Tierra. Cada imagen satelital se caracteriza por cuatro tipos de resoluciones: espacial, temporal, espectral y radiométrica. La resolución temporal se refiere a la frecuencia con que el satélite pasa por el mismo punto de la tierra; la resolución espacial se refiere al tamaño del pixel de la imagen; la resolución espectral corresponde al número de canales espectrales y su ancho de banda respectivo, que es capaz de captar un sensor; y, la resolución radiométrica es el número de niveles de gris en que se divide la radiación recibida.

Las imágenes satelitales presentan bandas del espectro electromagnético, y, a partir de esta información es posible identificar cuerpos de agua, cobertura de suelo, agricultura, cálculo de índices de estrés hídrico de las plantas, calcular temperatura, geología, recursos costeros, entre otros, esto debido a la propiedad de los cuerpos de absorber radiación en ciertos niveles y dispersar en otros. Por ello, debido a la utilidad de las imágenes satelitales, es necesario incorporar esta tecnología en la gestión del recurso hídrico.

En particular, el satélite Landsat 8 es el octavo lanzamiento del proyecto Landsat de la NASA y fue lanzado el 11 de febrero del 2013. Se encuentra orbitando a una altura de 705 km, inclinado en 98,2 grados, da vueltas alrededor de la tierra cada 99 minutos, presentando un ciclo de repetición de 16 días (resolución temporal). Adquiere un total de 740 imágenes por día, imágenes de 185 km x 180 km (USGS,

2020). Su descarga es gratuita y se encuentra disponible en la página de la NASA (<https://earthdata.nasa.gov/>). En la Tabla 2.2 se presenta el intervalo de longitudes de onda de cada banda:

Tabla 2.2: Bandas imágenes satelitales Landsat 8. Fuente: USGS (2020).

Banda	Nombre	Longitud de onda (µm)
1	Costera – Aerosoles	0,435 – 0,451
2	Azul	0,452 – 0,512
3	Verde	0,533 – 0,590
4	Rojo	0,636 – 0,673
5	Infrarrojo cercano (NIR)	0,851 – 0,879
6	Infrarrojo de onda corta 1 (SWIR 1)	1,566 – 1,651
10	(TIR 1)	10,60 – 11,19
11	(TIR 2)	11,50 – 12,51
7	Infrarrojo de onda corta 2 (SWIR 2)	2,107 – 2,294
8	Pancromática	0,503 – 0,676
9	<i>Cirrus</i>	1,363 – 1,384

A continuación, en la Figura 2.8 se muestra una imagen del satelital Landsat 8 correspondiente al 21 de febrero de 2018, la cual fue procesada para obtener el índice de área foliar del mes de febrero para cultivos ubicados en cuenca del Río Rapel. Aquí se ejemplifica la resolución espacial de 30 metros, donde observa que un predio agrícola puede tener un número importante de píxeles.

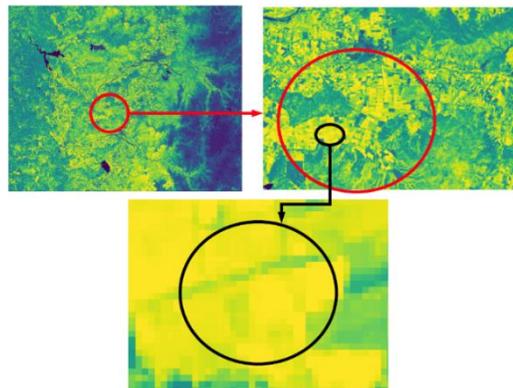


Figura 2.8: Ejemplo Imagen satelital Landsat 8- índice NDVI para la zona de la cuenca del río Rapel (Fecha: 2/02/2018).

Por otra parte, para poder tener un modelo de elevación digital es de gran utilidad el producto ALOS PALSAR, el cual posee una resolución espacial de 12,5 m. Pertenece al grupo de imágenes derivadas del satélite ALOS de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) y el producto se encuentra disponible en el portal de la NASA (search.asf.alaska.edu/#/).

El satélite ALOS fue lanzado en enero del 2006 y corresponde a la colección de imágenes obtenidas a través de su radar PALSAR. La colección de imágenes se desarrolló desde el 2006 hasta el 2011, y las dimensiones de las imágenes son de 50 km x 70 km, pasando cada 45 días (Geospatial, 2020).

2.2.6 Forzantes meteorológicas

Desde el trabajo de Arrhenius (1896) se conoce que el dióxido de carbono es una forzante del sistema climático, que tiene sensibilidad en la temperatura global. Luego, de acuerdo con los estudios de expertos, el IPCC define escenarios de cambio climático en función de la concentración del CO₂. En la Figura 2.9 (a) se muestran las concentraciones acumuladas de CO₂ para el periodo 2012-2100 en cada uno de los escenarios de emisión, y en (b) se muestra el cambio anual de temperatura media global en superficie con respecto al periodo histórico (1986-2005).

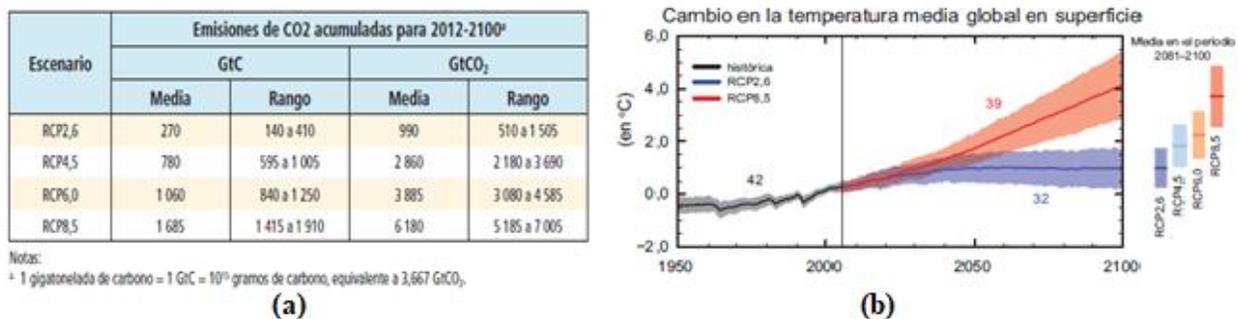


Figura 2.9: (a) Emisiones de CO₂ acumuladas para el periodo 2012-2100. Fuente: IPCC (2013) página 25, Cuadro RRP.3. (b) Cambio de temperatura de los escenarios climáticos. Fuente: IPCC (2013) página 19, figura RRP.7

En la Figura 2.9 se aprecia que para el escenarios RCP2.6 es probable que aumente la temperatura global en 0,3 °C a 1,7 °C , para el RCP4.5 en 1,1 °C a 2,6 °C , en el RCP 6.0 °C en 1,4 °C a 3,1 °C y en el escenario RCP8.5 en 2,6 °C a 4,8 °C.

Para la modelación con VIC en el proyecto “Actualización del Balance Hídrico Nacional” (DGA, 2018) se utilizan las forzantes históricas (1979 al 2015), derivadas del productivo grillado CR2MET (<http://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>), y forzantes futuras (2015-2059) que incorporan el efecto del cambio climático a partir de la consideración del escenario RCP 8.5, el cual conlleva una concentración de CO₂ en la atmósfera de 936 ppm para el año 2100, constituyéndose como el caso más pesimista.

Para las forzantes futuras se utilizan cuatro modelos de circulación global: CCSM4 (Community Climate System Model), CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), IPSL (Institut Pierre Simon Laplace), y MIROC (Model for Interdisciplinary Research on Climate), asociadas al escenario de emisiones de dióxido de carbono RCP8.5 (DGA, 2018). En adelante, para referirse a estos modelos se utiliza la abreviación GCMs. Para la selección de los GCMs se tomaron en cuenta los siguientes criterios (DGA, 2018): correlación de las simulaciones históricas con los patrones de variabilidad interanual ENSO (El Niño-Southern Oscillation) y SAM (Southern Annular Mode); análisis de sensibilidad climática; y análisis de deltas de temperatura y precipitación a escala regional. La justificación de la elección de estos modelos se encuentra en el estudio del proyecto “Aplicación de la

Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las cuencas de las macrozonas Norte y Centro” (DGA, 2018).

3 ANTECEDENTES ZONA DE ESTUDIO

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1.1 Generalidades

La zona de estudio corresponde a la cuenca del río Rapel, ubicada en Chile Central (~34-35°S), cuya área comprenden la Región del Libertador General Bernardo O’Higgins y la Región del Maule. El río Rapel se compone de las subcuencas del río Cachapoal (Código BNA 6019003) y río Tinguiririca (Código BNA 6035001) (Ver Figura 3.1). La cuenca del río Rapel comprende un área de 11.922 km², presentando una cota mínima de 192 [m.s.n.m] y una cota máxima de 3944 [m.s.n.m]. La subcuenca del Río Cachapoal comprende un área de 6.265 [km²], mientras que la subcuenca del Río Tinguiririca comprende un área de 3.535 [km²] (Álvarez-Garretón et al., 2018).

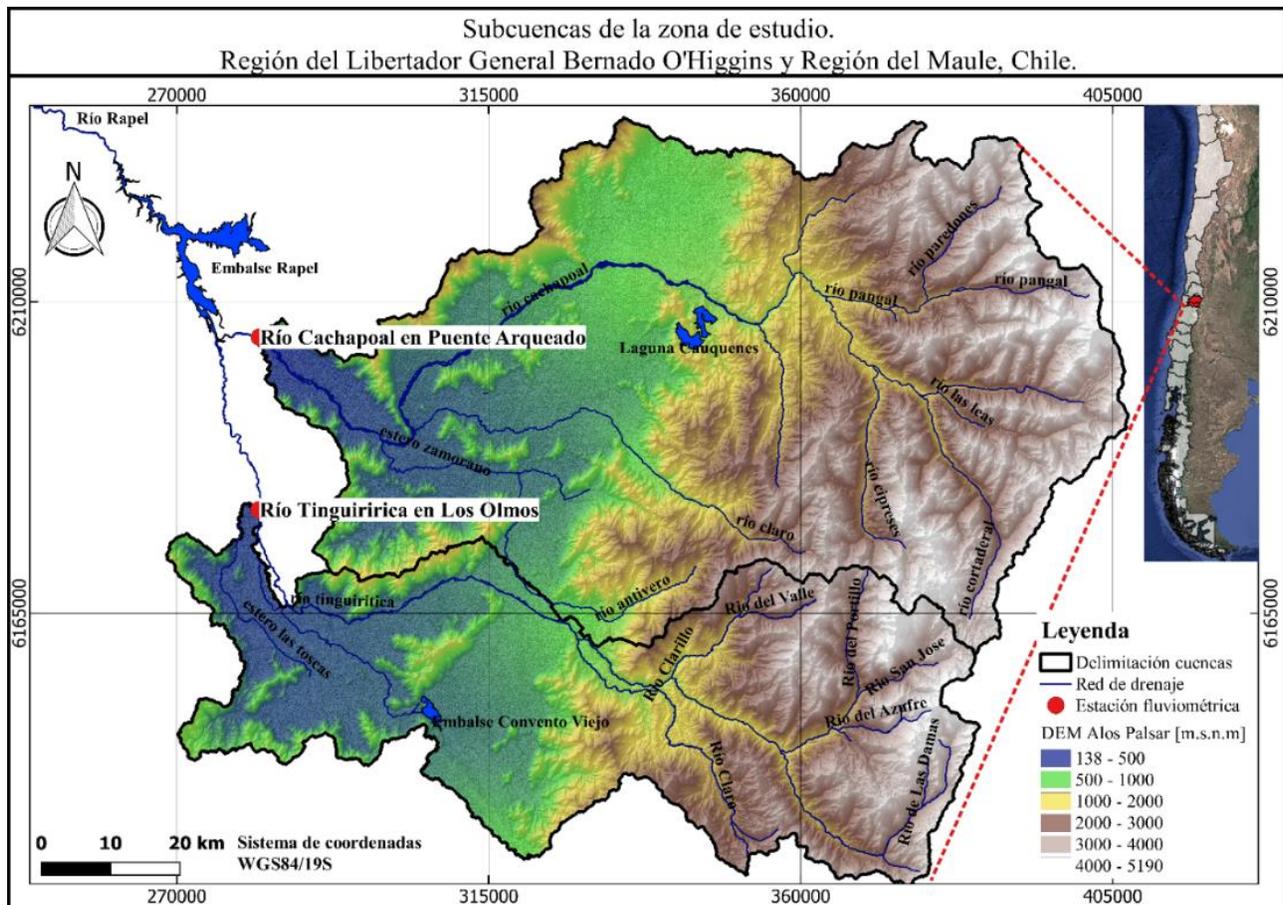


Figura 3.1: Identificación zona de estudio. Se exponen los ríos y las cotas de terreno. Fuente DEM: ASF DAAC (2019); © JAXA/METI 20011.

En la Figura 3.1 se identifican dos cuerpos de agua, el Embalse Estero Viejo de la comuna de Chimbarongo, y la laguna Cauquenes que actualmente corresponde a un relave. Luego, en la Figura 3.2

se muestra la división político-administrativa de la cuenca. La subcuenca del río Cachapoal contiene las comunas de: Rancagua, Machalí, Codegua, Graneros, Doñihue, Olivar, Coinco, Requínoa, Rengo, Quinta de Tilco, Coltauco, Malloa, San Vicente de Tagua Tagua, Peumo, Las Cabras. Mientras la subcuenca del río Tinguiririca, contiene las comunas de: Santa Cruz, Nancagua, Chépica, Teno, Nancagua, Placilla, Chimbarongo y San Fernando.

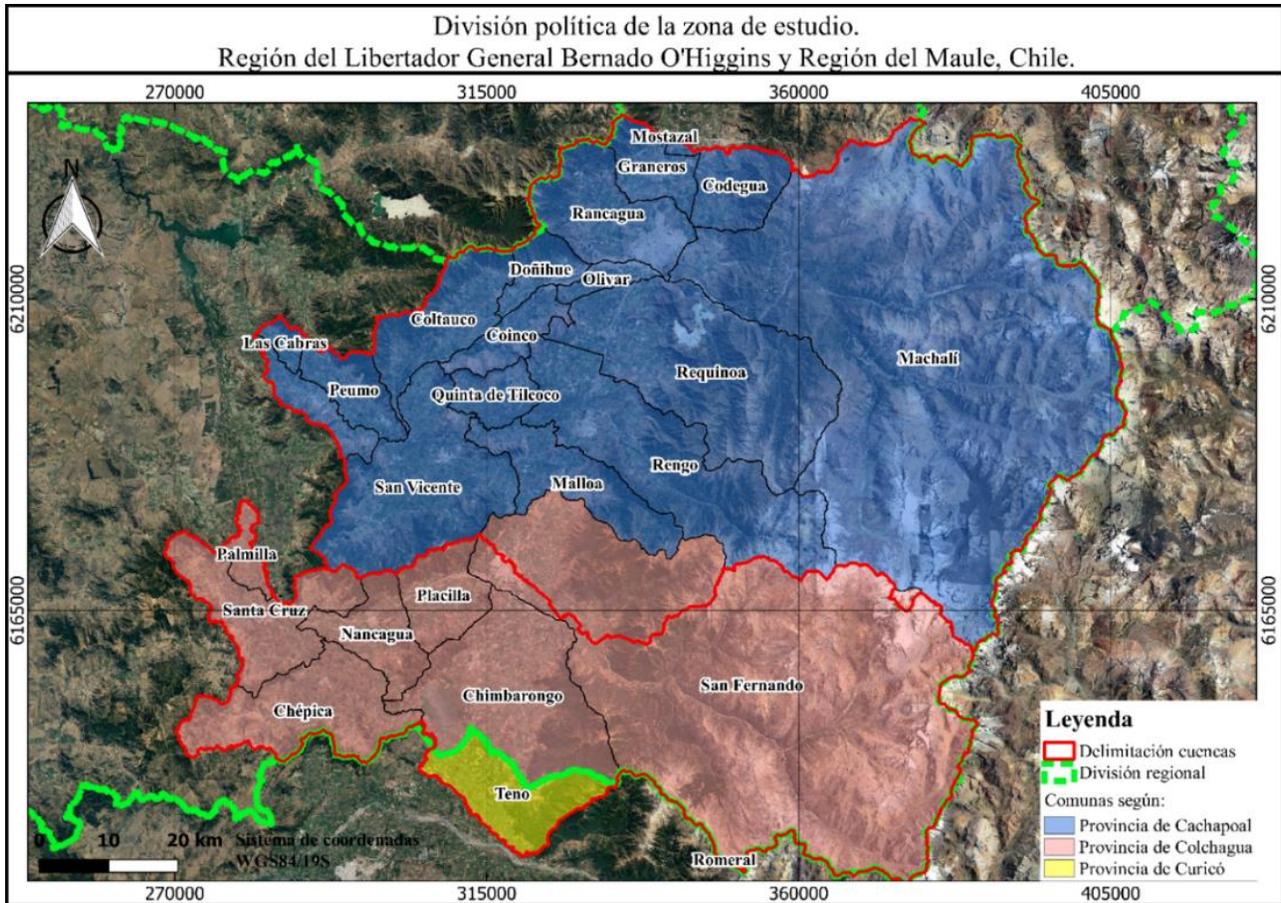


Figura 3.2: División comunal de la zona de estudio. Fuente: División político-administrativa (IDE-Chile, Infraestructura de datos geoespaciales de Chile, del Ministerio de Obras Nacionales)

3.1.2 Climatología

En cuanto a la climatología de la zona, presenta una precipitación media anual 946 [mm] para la Cuenca de Cachapoal y 1097 [mm] para Cuenca de Tinguiririca (Álvarez Garretón et al., 2018). En la Figura 3.3 se presenta la climatología de la para ambas subcuencas, exponiendo en el eje y de la izquierda la precipitación media mensual en el periodo (1979-2016), y en el eje y de la derecha la temperatura mínima, media y máxima, en el mismo periodo. Para su creación se utilizó el producto de CAMELS-CL, cuya estimación por cuenca es en base al producto grillado CR2MET.

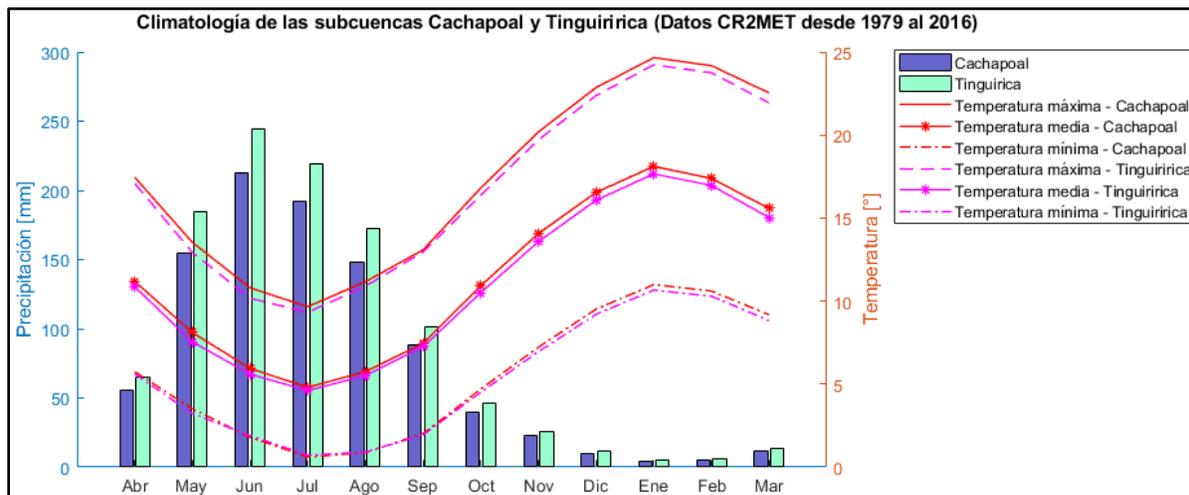


Figura 3.3: Precipitación y temperatura media mensual (1979-2016) para ambas subcuencas. Fuente: Datos CR2MET adquiridos desde CAMELS-CL (Álvarez Garretón et al., 2018).

A partir de la Figura 3.3 se observa que la precipitación ocurre principalmente en el periodo de invierno, siendo el mes de junio el de mayor precipitación, con 250 [mm] en la subcuenca de Tinguiririca y 200 [mm] en la subcuenca de Cachapoal. En el periodo de abril a septiembre, la temperatura mínima es cercana a los 2 [°C], la media a 7 [°C], y la máxima a 12 [°C]. Luego, de octubre a marzo la temperatura mínima es cercana los 9 [°C], la media a 15 [°C], y la máxima a 22 [°C].

La Cuenca del Río Rapel presenta un régimen mixto, es decir se observan régimen nivales, pluviales y mixtos en los afluentes principales. Según (DGA, 2004), los regímenes nivales se presentan en la parte alta de la subcuenca del río Cachapoal; los regímenes pluviales se observan en el estero Zamorano, este último perteneciente a la subcuenca río Cachapoal; y los regímenes mixtos se observan en la subcuenca del río Tinguiririca, con mayor influencia nival en la parte alta y pluvial en la parte baja, y en la subcuenca baja del río Cachapoal.

3.1.3 Uso de suelo

Debido a la necesidad de conocer las áreas de cultivos de la zona de estudio, es de utilidad el uso de suelo desarrollado por el Laboratorio de Geomática y Ecología de Paisaje GEP (Zhao et al., 2016), el cual se presenta en la Figura 3.4.

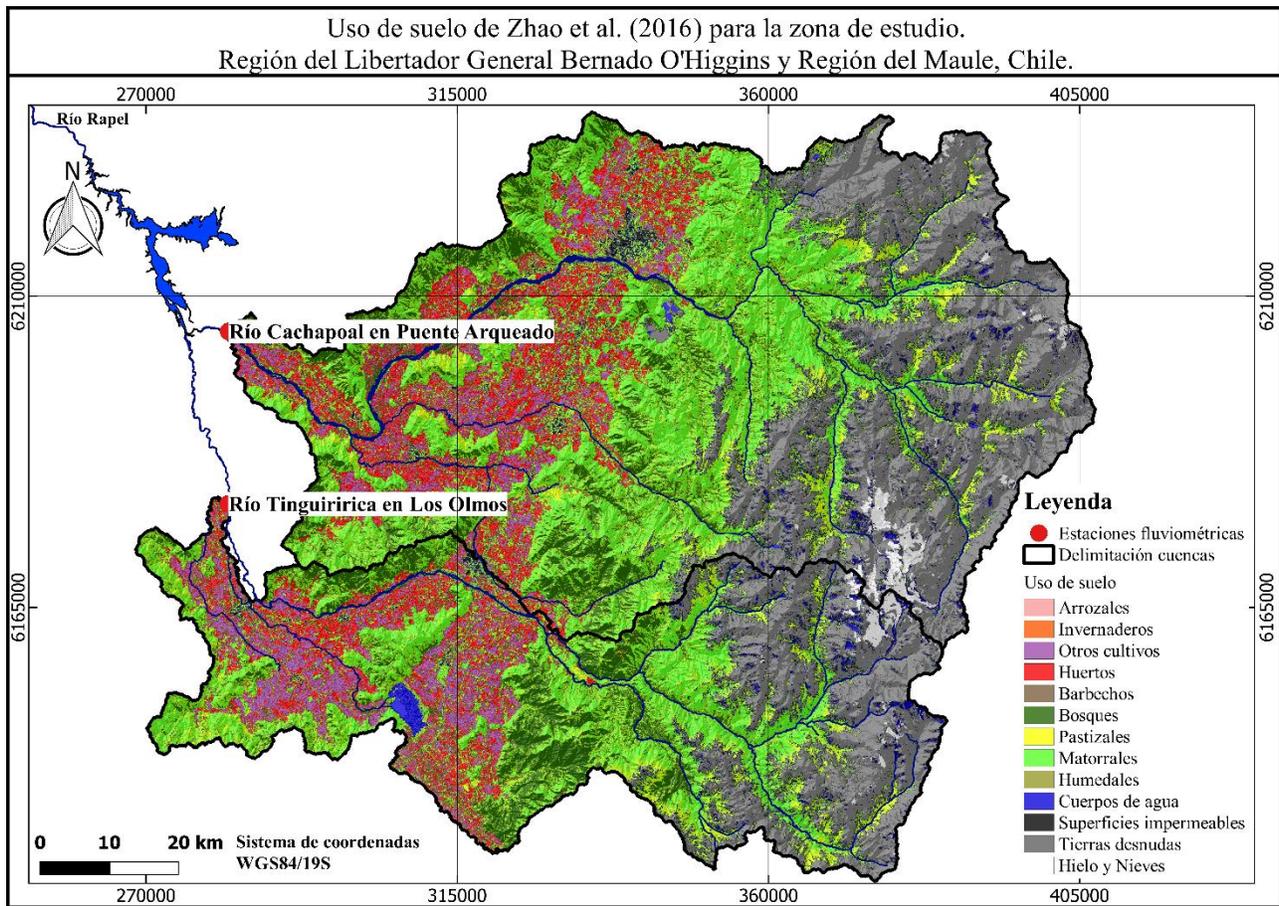


Figura 3.4: *Uso de suelo de la Cuenca del Rapel. Fuente: (Zhao et al., 2016)*

En base a este uso de suelo, en la Tabla 3.1 se expresa la distribución en cada clase:

Tabla 3.1: *Porcentaje del cada tipo de uso de suelo, para cuenca del río Rapel. Fuente: (Zhao et al., 2016)*

Tipo de uso de suelo	Área [km ²]	Porcentaje de la cuenca del río Rapel [%]
Cultivos	2293	19%
Bosques	1802	15%
Pastizales	1854	15%
Matorrales	2175	18%
Humedales	147	1%
Cuerpos de agua	422	3%
Superficies impermeables	422	3%
Tierras desnudas	3100	25%
Hielo y nieve	111	1%
Área Total	12324	100%

El proyecto “Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las cuencas de las macrozonas Norte y Centro” (DGA, 2018) utiliza como uso de suelo el trabajo de Zhao et al. (2016), el cual se denomina en este trabajo como “Caso Base”. El cual considera las siguientes clases: 1- Anuales (el cual incluye a arrozales, invernaderos, huertos, barbechos y otros cultivos, expuestos en la Figura 3.4), 2-Bosques, 3-Pastizales, 4-Matorrales, 5-Humedales, 6-Cuerpos de agua, 7-Superficies impermeable, 8-Hielos y nieve.

3.2 INFORMACIÓN DISPONIBLE SOBRE AGRICULTURA.

3.2.1.1 Censo Agropecuario y Forestal 2007

El Censo Agropecuario y Forestal 2007, llevado a cabo por el Instituto de estadística (INE), corresponde al último censo agrícola que contempla el registro de todos los predios de la zona de estudio. Este censo dispone de manera libre y entrega el área total cultivada a nivel de comunas. En base a esta información, se logra identificar los cultivos más representativos de la zona de estudio. Sin embargo, por no contar con cultivos georreferenciados a nivel de predios, no es de utilidad para la estimación de parámetros como el LAI y albedo.

En este censo los cultivos se agrupan en nueve clases (NIVEL I) y estos a su vez subdividen en un conjunto de tipos de cultivos (NIVEL II). El NIVEL I se clasifica en los siguiente grupos: 1-Cereales (19 tipos de cultivos), 2-Industriales (32 tipos de cultivos), 3-Leguminosas y tubérculos (9 tipos de cultivos), 4-Forrajeras anuales (20 tipos de cultivos), 5-Forrajeras permanentes (20 tipos de cultivos), 6-Hortalizas (56 tipos de cultivos), 7-Frutales – Mayores (23 tipos de cultivos) , 8-Frutales – Menores (45 tipos de cultivos) , 9-Viñas y parronales (5 tipos de cultivos). A partir de la información del NIVEL I, se muestra en la Figura 3.5 el porcentaje de cobertura para la zona de estudio.

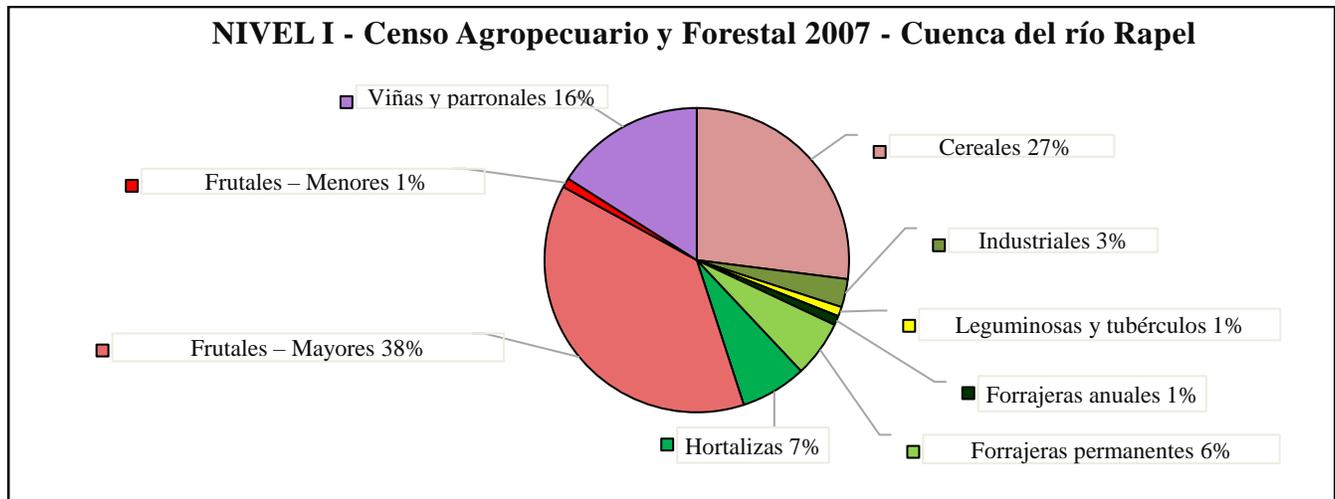


Figura 3.5: Porcentaje de la clasificación (Nivel I) del Censo Agropecuario y Forestal 2007, para la cuenca de Rapel.

En consecuencia, se tiene en primer lugar a los Frutales - Mayores con un 38%; en segundo lugar, los cultivos Anuales - Cereales con un 27%; en tercer lugar, las Viñas con un 16 %; y en cuarto lugar el grupo de las hortalizas con un 7%.

En la Tabla 3.2 se presentan los cultivos (del NIVEL II) ordenadas según su porcentaje de área cultivada en la cuenca del río Rapel, en donde se seleccionaron los cultivos con porcentaje mayor a 0,25%.

Tabla 3.2: Cultivos ordenados según porcentajes cultivos del Censo Agropecuario y Forestal 2007 (NIVEL II)

Orden	Cultivo Nivel II	Área %	Grupo Nivel I
1	Maíz	24,41%	1.Anuales-Cereales
2	Tinto fina	11,81%	9.Viñas
3	Uva de mesa	8,10%	7.Frutales-Mayores
4	Manzana roja	4,37%	7.Frutales-Mayores
5	Alfalfa	3,94%	5.Forrajes -Permanentes
6	Ciruelo europeo	3,04%	7.Frutales-Mayores
7	Duraznero conservero	2,52%	7.Frutales-Mayores
8	Cerezo	2,39%	7.Frutales-Mayores
9	Manzana verde	2,08%	7.Frutales-Mayores
10	Blanco fina	2,03%	9.Viñas
11	Peral europeo	1,95%	7.Frutales-Mayores
12	Naranjo	1,85%	7.Frutales-Mayores
13	Tomate industrial	1,80%	2.Anuales-Industriales
14	Kiwi	1,79%	7.Frutales-Mayores
15	Ciruelo japonés	1,67%	7.Frutales-Mayores
16	Tinto corriente	1,61%	9.Viñas
17	Nectarino	1,54%	7.Frutales-Mayores
18	Durazno consumo fresco	1,54%	7.Frutales-Mayores
19	Palto	1,35%	7.Frutales-Mayores
20	Trigo Blanco	1,31%	1.Anuales-Cereales
21	Mezcla de forrajeras	1,29%	5.Forrajes -Permanentes
22	Nogal	1,20%	7.Frutales-Mayores
23	Trigo C.	1,20%	1.Anuales-Cereales
24	Almendro	0,96%	7.Frutales-Mayores
25	Zapallo	0,94%	6.Hortalizas
26	Cebolla	0,89%	6.Hortalizas
27	Choclo	0,86%	6.Hortalizas
28	Melón	0,75%	6.Hortalizas
29	Tabaco	0,70%	2.Anuales-Industriales
30	Tomate	0,58%	6.Hortalizas
31	Papa	0,58%	3.Anuales-Leguminosas y Tubérculos
32	Sandía	0,50%	6.Hortalizas
33	Arándano	0,49%	7.Frutales-Menores
34	Maicillo	0,45%	4.Forrajes – Anuales
35	Limón	0,44%	7.Frutales-Mayores
36	Poroto	0,43%	3.Anuales-Leguminosas y Tubérculos
37	Olivo	0,40%	7.Frutales-Mayores

Orden	Cultivo Nivel II	Área %	Grupo Nivel I
38	Remolacha	0,39%	2.Anuales-Industriales
39	Huerta	0,37%	6.Hortalizas
40	Trébol rosado	0,29%	5.Forrajes -Permanentes
41	Otras hortalizas	0,28%	6.Hortalizas
42	Blanco corriente	0,26%	9.Viñas
	TOTAL	95,35%	

De los 42 cultivos presentados en la Tabla 3.2 se completa un total de 95,35%. De esta información, se observa que en primer lugar se tiene el Maíz, correspondiente cultivo Anuales-Cereales con un 24% de participación, seguido por “tinto fina”, un tipo de Viña con un 11,81%, y, en tercer lugar, se tiene la “uva de mesa” clasificada dentro de Frutales-Mayores con un 8,1%. Además, luego se observa que los cultivos del grupo Frutales-Mayores son los que están en los primeros lugares, y algunas hortalizas agrupadas con forrajeras pueden ser relevantes, de la misma forma, al agrupar los anuales se tiene una participación significativa.

3.2.1.2 Catastros de información agrícola.

En cuanto a información georreferencia de cultivos, se identifican dos catastros vegetacionales: un catastro frutícola y un catastro hortícola, ambos disponibles para la zona de estudio. El Catastro Frutícola fue realizado por CIREN y se encuentra de manera libre en el sitio web del Sistema de consulta estadístico territorial (icet.odepa.gob.cl). Este catastro, comprende cultivos frutales e incluye viñedos. Mientras que, el Catastro Hortícola también es llevado a cabo por CIREN para el Consejo Regional de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, y se encuentra de manera libre en el sitio web del Sistema de monitoreo territorial hortícola (SITMHOR) de consulta estadístico territorial (sitmhor.ciren.cl). Este catastro comprende cultivos hortícolas e incluyen al maíz (cultivo representativo de los anuales, según Censo Agropecuario y Forestal del 2007).

En la Figura 3.6 se presenta para la zona de estudio la identificación de los catastros hortícolas y frutícola sobre el área de cultivo de Zhao et al. (2016).

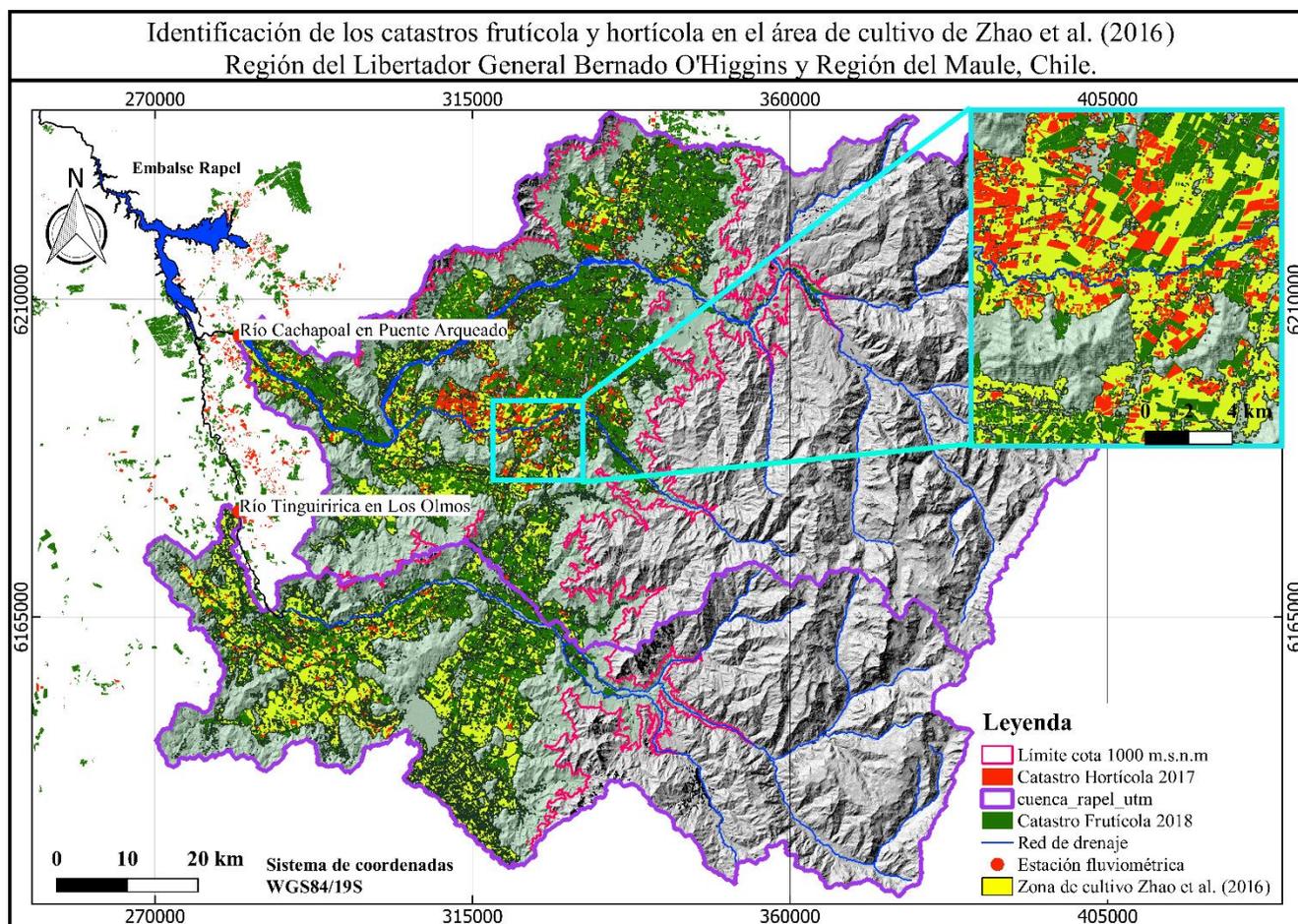


Figura 3.6: Identificación de los catastros en el área de cultivo de Zhao et al. (2016). Fuente catastro frutícola: Odepa, creado por CIREN. Fuente Catastro hortícola: Sistema de Monitoreo hortícola (stmhor) creado por CIREN.

4 METODOLOGÍA

Este trabajo se enfoca en el estudio de las modificaciones al uso de suelo agrícola, considerando cambio climático en la cuenca del río Rapel, en donde se utiliza el modelo hidrológico VIC. En el proyecto “Actualización del Balance Hídrico Nacional” (DGA, 2018), se simuló esta cuenca utilizando los registros meteorológicos históricos y el escenario de uso de suelo actual (Zhao et al., 2016), lo que constituye el “Caso base” según DGA (2018), denominado en el presente trabajo como CB.

El CB es mejorado a través del Censo Agropecuario y Forestal del 2007 (INE, 2007). El caso ampliado se denomina “Caso Base Catastrado” (CBC). Esto se hace necesario, por el hecho que el CB representa los cultivos agrícolas en una sola clase, en cambio el CBC busca contar con un set de cultivos agrícolas representativos de la zona de estudio, de modo de tener un uso de suelo con mayor detalle en cuanto a agricultura.

Se plantea una evaluación a nivel de celda de la respuesta hidrológica de cada cultivo agrícola, tanto en el periodo histórico como en el futuro, con el fin de identificar cultivos apropiados para la zona de estudio. Además, para cada cultivo se evalúa el cambio en la respuesta hidrológica debido a su ubicación en la cuenca, de modo de estimar zonas donde el valor de su demanda evapotranspirativa es menor al promedio de todas las ubicaciones, lo cual se denomina “zona óptima”.

Luego, a nivel de cuenca, en base a la evaluación del “Caso Base Catastrado” y la consideración de la respuesta hidrológica de cada cultivo, se planea escenarios de cambio de matriz agrícola. Estos escenarios constituyen los escenarios futuros, los cuales consideran modificaciones en el porcentaje de los cultivos, el área máxima a cultivar y la ubicación de estos.

Finalmente, con la comparación de la respuesta hidrológica de los escenarios futuros con respecto al CBC, se indican recomendaciones para el uso de suelo futuro, las cuales son acordes a las condiciones meteorológicas y de disponibilidad hídrica futura dadas por el cambio climático.

4.1 MEJORA DEL USO DE SUELO CB

El CB corresponde a uso de suelo de Zhao et al. (2016) con el cual ha sido previamente evaluada la cuenca. El CB cuenta con ubicación del área total en el cual se ubican los cultivos agrícolas, pero estos se agrupan en una única clase de cultivo (denominado “anuales”). Por ello, el CB requiere ser mejorado, de modo que el uso de suelo contenga un set de clases de cultivos representativos de la zona, y que además estos se distribuyan de acuerdo con porcentajes característicos.

En base a esto, es de utilidad el Censo Agropecuario y Forestal del 2007 (INE, 2007), el cual entrega el área total cultivada de cada cultivo por comuna. Además, por la necesidad de seleccionar cultivos que dispongan de ubicación geográfica, de modo de determinar parámetros mensuales, como el *LAI* y *albedo*, se hace imperativo la utilización de cultivos presentes en los catastros agrícolas de la zona. En la Figura 4.1 se presenta un diagrama de la creación del CBC.

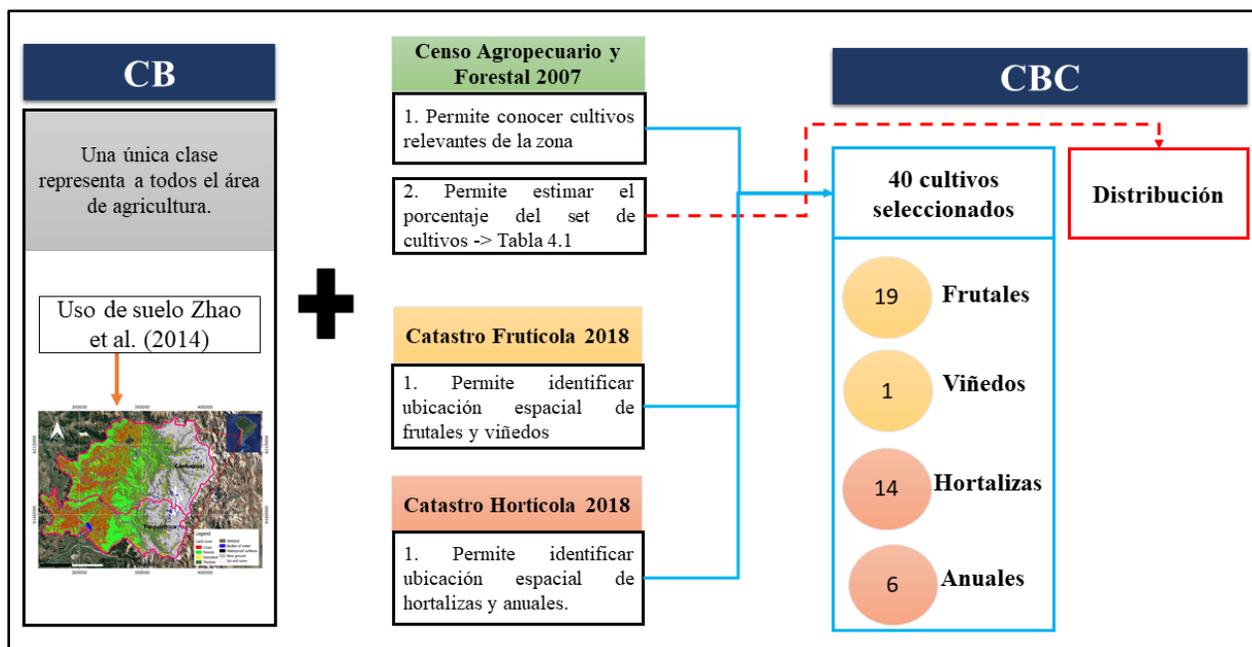


Figura 4.1: Diagrama de mejora del caso base (CB) al caso base catastrado (CBC).

Para obtener el CBC, se llevan a cabo las siguientes etapas:

Etapas I: Identificación de cultivos representativos.

En base al análisis de la información de la Tabla 3.2 de la revisión bibliográfica, en donde se presentan los cultivos del Censo Agropecuario y Forestal del 2007 ordenados según su porcentaje de área en la zona de estudio, se observa lo siguiente:

- Los Frutales poseen relevancia en la zona de estudio, comprendiendo un 29,58% del total cultivado. Además, estos tienen una alta participación, ya que 18 de los 42 cultivos corresponden a frutales.
- El maíz junto con el choclo presenta un total 25,27% del total cultivado, siendo el maíz el cultivo más representativo de la zona.
- Luego, el grupo de hortalizas, junto con anuales y forrajes suman un total de 16,7% del total cultivado.

En base a esto, se decide tener 4 grupos de cultivos, en donde el grupo de “anuales” (corresponden a la suma de cereales, tubérculos, leguminosas, y cultivos industriales), el grupo de las “hortalizas” (incluye hortalizas y forrajeras), el grupo de los “frutales” (incluye frutales mayores y menores) y el grupo de “viñedos” (que incluye viñas y vid de mesa). Luego el número de cultivos por grupos depende de la información georreferenciada disponible, lo cual se realiza en la siguiente etapa.

Etapas II: Selección de set de cultivos y fracción del CBC.

En primer lugar, se identifican los cultivos de la Tabla 3.2 en los catastros disponibles, donde en caso de no estar presente en los catastros, se opta por el más cultivado según el catastro respectivo. Del Catastro Frutícola se decide por representar el grupo de “frutales” con 19 cultivos y el grupo de “viñedos” por el cultivo vid de mesa. A partir del Catastro Hortícola se seleccionan 14 cultivos representativo de las

“Hortalizas” y 6 cultivos representativos de los “anuales”. Con esto se tienen 40 clases de cultivos agrícolas para el uso de suelo CBC.

Debido a que se requiere distribuir estos cultivos dentro del área agrícola definida en el CB como un área homogénea, se busca determinar los porcentajes de área de cada cultivo, para lo cual se emplean los valores de área dados por el Censo Agropecuario y Forestal del 2007. Para ello se suman los valores de área de cada cultivo de las comunas pertenecientes a dicha subcuenca, de modo de obtener un porcentaje de área por subcuenca. Cabe mencionar que las comunas por subcuencas se representan en la Figura 3.2. De este modo, en la Tabla 4.1 se presenta por cada subcuenca, el porcentaje de cada cultivo.

Tabla 4.1: Porcentaje de cultivo estimado para las 40 clases, para cada subcuenca de la zona de estudio. Fuente: Censo Agropecuario y Forestal 2007 (IDE).

Nombre	Tipo de cultivo	Cachapoal	Tinguiririca
Tomate industrial	Anuales	1,45%	2,33%
Zapallo guarda	Hortalizas	0,85%	1,90%
Cebolla guarda	Hortalizas	0,98%	1,28%
Melón	Hortalizas	1,30%	0,46%
Maíz	Anuales	26,80%	41,95%
Papa	Anuales	1,40%	0,34%
Tomate fresco	Anuales	0,93%	0,20%
Sandía	Hortalizas	1,03%	0,35%
Ajo	Hortalizas	0,34%	0,11%
Poroto granado	Anuales	0,49%	1,11%
Alcachofa	Hortalizas	0,03%	0,01%
Repollo	Hortalizas	0,13%	0,04%
Cebolla intermedia	Hortalizas	0,00%	0,00%
Cebolla temprana	Hortalizas	0,16%	0,11%
Haba	Anuales	0,02%	0,08%
Frutilla	Hortalizas	0,02%	0,01%
Zapallo italiano	Hortalizas	0,18%	0,16%
Ají	Hortalizas	0,07%	0,29%
Pimiento	Hortalizas	0,11%	0,53%
Lechuga	Hortalizas	0,13%	0,03%
Cerezo	Frutales	2,68%	2,91%
Vid de mesa	Viñas	21,80%	18,73%
Ciruelo europeo	Frutales	3,03%	7,54%
Nogal	Frutales	2,21%	0,30%
Manzano rojo	Frutales	3,81%	6,06%
Olivo	Frutales	0,48%	2,07%
Peral	Frutales	2,57%	2,06%

Nombre	Tipo de cultivo	Cachapoal	Tinguiririca
Duraznero conservero	Frutales	4,54%	0,65%
Nectarino	Frutales	2,98%	0,11%
Kiwi	Frutales	1,84%	2,34%
Almendro	Frutales	2,12%	0,40%
Ciruelo Japonés	Frutales	2,79%	0,84%
Manzano verde	Frutales	2,67%	2,05%
Naranja	Frutales	3,06%	0,88%
Palto	Frutales	2,61%	0,20%
Mandarino	Frutales	0,32%	0,04%
Arándano americano	Frutales	0,42%	0,94%
Duraznero fresco	Frutales	3,04%	0,14%
Pluots	Frutales	0,04%	0 %
Limonero	Frutales	0,59%	0,51%

Luego el CBC queda definido por 40 clases de cultivos, los cuales de acuerdo con los porcentajes de la Tabla 4.1, cubren la zona asociada a las clasificaciones: anuales, barbechos, invernaderos y otros cultivos, presentes en el uso de suelo de Zhao et al. (2016).

Finalmente, se supone que dichos porcentajes de cultivo representa la distribución de clases dentro de cada celda simulada. Con ello, se obtiene el CBC por subcuenca, el cual comprende una mejora al CB, ya que considerar un set de cultivos representativo de la zona de estudio, y utiliza porcentajes dado por el Censo Agropecuario y Forestal del 2007, el cual comprende un registro completo del área agrícola.

4.2 DETERMINACIÓN PARÁMETROS VEGETACIONALES.

En esta sección se estiman los parámetros vegetaciones de los 40 cultivos seleccionados, dichos parámetros son definidos en el capítulo 2 (sección 2.2.4 Definición de parámetros vegetacionales).

4.2.1 Parámetros vegetaciones a partir de imágenes satelitales.

Los parámetros mensuales, tales como el *LAI* y *albedo*, son estimados a partir de imágenes satelitales Landsat 8. El *LAI*, es estimado a partir de su relación con el *NDVI* según Johnson (2003), de acuerdo con la Ecuación 4.1.

$$LAI = 4,9 \cdot NDVI - 0,46 \quad (4.1)$$

Mientras que el Índice *NDVI* se estima según Díaz et al. (2010), correspondiente a la Ecuación 2.22 presentada en el capítulo 2 (sección 2.2.4 Definición de parámetros vegetacionales).

Luego, el *albedo* se estima según la ecuación 4.3 definida para superficies vegetales según Duguay & Ledrew (1992).

$$Albedo = 0.526 \cdot Banda3 + 0.362 \cdot Banda5 + 0.112 \cdot Banda7 \quad (4.2)$$

Para conocer el valor de *LAI* y *albedo* de cada uno de los cultivos, se requiere conocer la ubicación de predios que tengan estos cultivos. Por ello, se utilizan el Catastro Frutícola (CIREN) y el Catastro Hortícola (CIREN). Para los frutales y viñedos se utiliza el Catastro Frutícola 2018, por lo que se bajaron las imágenes satelitales del año 2018. En el caso, de anuales y hortalizas se empleó el Catastro Hortícola del 2017, que representan los cultivos de la temporada primavera 2016/verano 2017, por el hecho de que los cultivos catastrados en el 2017 fueron plantados desde julio a diciembre del 2016 y su desarrollo máximo se extiende hasta el siguiente semestre (enero a junio del 2017). Luego, en función de las fechas en que estos catastros son realizaron, se descargan las imágenes satelitales de dichos periodos. Con ello, en la Tabla 4.2 se presenta un resumen de los catastros y fechas de las imágenes Landsat 8 descargadas:

Tabla 4.2: Fuente de imágenes Landsat 8 utilizadas para los grupos de cultivos.

Grupos	Número de clases	Catastro de predios	Fuente Catastro	Periodo	Fechas imágenes Landsat 8
Anuales	6	Catastro hortícola 2017	(CIREN, 2017)	2016-2017	(Julio - diciembre) 2016- (enero - junio) 2017
Hortalizas	14	Catastro hortícola 2017	(CIREN, 2017)	2016-2017	(Julio -diciembre) 2016- (enero - junio) 2018
Frutales	19	Catastro Frutícola 2018	(CIREN, 2018)	2018	Enero a diciembre 2018
Viñas	1	Catastro Frutícola 2018	(CIREN, 2018)	2018	Enero a diciembre 2018

A continuación, se describen la metodología de trabajo para la obtención de los parámetros *albedo* y *LAI*, en base a las imágenes satelitales utilizadas:

1. Se seleccionan las fechas de las imágenes satelitales Landsat 8 extraídas de manera gratuita desde la página de la NASA (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), donde se utilizaron todas las imágenes libres de nubes dentro del periodo señalado en la Tabla 4.2. Sin embargo, en los meses de invierno se presentan nubes, por lo que se seleccionan las imágenes con nubosidad media, a las cuales se eliminaron los píxeles con presencia de nubes, de modo de no utilizar dicha información en las siguientes etapas.
2. Luego, se realiza una corrección de las imágenes satelitales, la cual consiste en una corrección atmosférica. Este tipo de corrección trata de eliminar las distorsiones debido a la interferencia de la atmósfera, la cual se produce en los valores de radianza que llegan al sensor desde la superficie terrestre.
3. Una vez corregidas, se aplica el álgebra de bandas para obtener el *LAI* y *albedo* de cada fecha utilizada, a partir de las Ecuaciones 4.1, 4.2 y 2.23. En la Figura 4.2 (A) se presenta el NDVI obtenido para la imagen Landsat 8 del 18 de mayo, donde en color celeste se identifican las nubes, las cuales no se considera en las etapas siguientes.

4. Para cada cultivo sub-i, se realiza una intercepción entre los polígonos derivados de los catastros y el resultado de *LAI* o *albedo* de la fecha sub-j. En la Figura 4.2 (B) se presenta como ejemplo, el catastro de vid de mesa derivado del catastro Frutícola (CIREN, 2018). Luego, debido a que se identificaron varios predios para cada cultivo en los catastros, se cuenta con varios puntos de control, lo que unido a la resolución de 30 metros de las imágenes Landsat 8, permite disponer de un conjunto importante de valores asociado al cultivo sub-i de la fecha sub-j. Con ello, finalmente, se calcula la media.

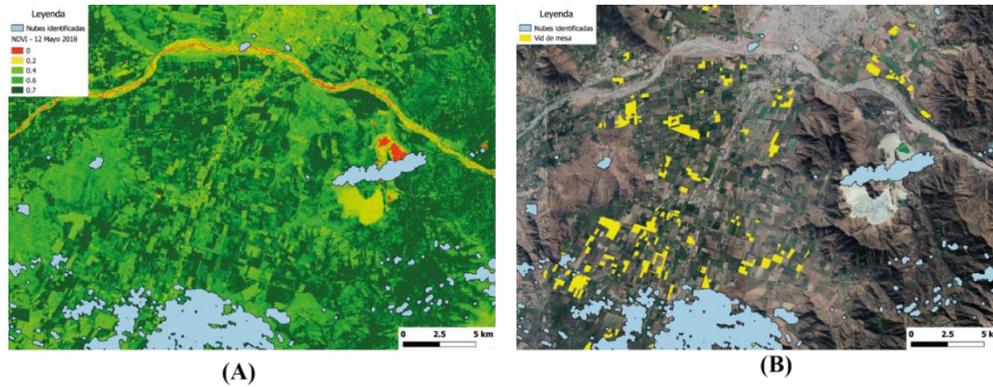


Figura 4.2: En (A) Se presenta el cálculo del NDVI de la imagen Landsat 8 con fecha 18/05/2018. En (B) se presenta el catastro de vid de mesa del catastro frutícola 2018.

5. Como se requiere un valor mensual en el modelo VIC, se lleva a cabo una interpolación a partir de las fechas disponibles, de modo de obtener la quincena de cada mes. Esto unido, a la presencia de nubes en algunas fechas, se tiene un menor número de píxeles promediados en estas, por lo que su valor se hace menos fidedigno. Por esta razón, en esta etapa se determina qué fechas eliminar de modo de tener un buen ajuste anual.

4.2.2 Parámetros vegetaciones a partir de información bibliografía

Otro grupo de parámetros vegetaciones fueron estimados a partir de información bibliográfica. Los cuales se describen a continuación:

1. **Desplazamiento(*d*) y rugosidad (*Ro*):** Para este caso se utiliza la estimación recomendada por el grupo UW Hydro Computational Hydrology de la Universidad de Washington, y la condición que la suma de la rugosidad y desplazamiento corresponden a la altura del cultivo (*h*). Con ello se tienen la Ecuación 4.3 que estima el valor del desplazamiento y Ecuación 4.4 que estima el valor de la rugosidad.

$$d = 0,67 \cdot h \tag{4.3}$$

$$Ro = 0,33 \cdot h \tag{4.4}$$

Debido a que requieren valores mensuales, se estima la altura mensual del cultivo, considerando el producto entre la altura máxima del cultivo (h_{max}) obtenida según información bibliográfica y un factor, dado por la razón entre el parámetro *LAI* del mes *m* (LAI_m) y el valor máximo anual del *LAI* (LAI_{max}). Luego la altura del cultivo en el mes *m* se estima según la Ecuación 4.5.

$$h(m) = h_{max} \cdot \frac{LAI_m}{LAI_{max}} \quad (4.5)$$

2. **Rarc (resistencia arquitectónica):** En base a la Revisión bibliográfica, según Saugier & Katerji (1991) este valor se encuentra en torno a 2 [s/m], presentando una variación acotada entre cultivos, por lo que se opta por representar a todos los cultivos por dicho valor.
3. **Rmin (resistencia mínima estomática):** En base a la Revisión bibliográfica, donde se analiza una alta variación entre cultivos, se realiza una investigación bibliográfica de este parámetro, de modo de estimar un rango posible para cada cultivo, dichos valores se presentan en resultados. Además, en las clases de vegetación no agrícola, se cambia el valor de bosques, pastizales y matorrales del trabajo DGA (2018), con fin de mejorar la representación los cultivos nativos que se presentan en la zona, los cuales según Dickinson (1993) tiene un valor de 200 (s/m), debido a que presentan alta resistencia estomática en comparación a otras clases de vegetación.
4. **RGL (radiación mínima a la que se inicia la transpiración):** Se considera un valor único por la falta de estudios especializados por cultivo y se utiliza el valor de 200 [W/m²] (Bower et al. (1977)).
5. **Rad_atten (factor de atenuación de la radiación):** Debido a que según el grupo UW Hydro Computational Hydrology de la Universidad de Washington se establece normalmente de 0,5 y requiere ser ajustada solo si la cuenca se ubica en latitudes alta, se mantiene en 0,5 pues la zona de estudio se ubica en latitudes medias.
6. **Trunk_atten (fracción de la altura total del cultivo que corresponde a tronco libre de hojas):** se estableció una razón promedio, considerando el cultivo en su desarrollo máximo y la observación de cultivos en cuanto a morfología típica.
7. **Root_depth y Root_fraction:** Estos parámetros se definen por cultivo, y en base a estudios realizados, donde se analizaron plantas en desarrollo y se pesan las raíces por cada profundidad, de modo de obtener una distribución de raíces. Estos estudios de distribución de raíces son realizados bajo diferentes climas y condiciones de riego, debido a esto se consideran los valores promedios entre diferentes condiciones.

4.3 VARIABLES OUTPUT EMPLEADOS EN EL ANÁLISIS

Del modelo VIC se utilizan los siguientes outputs:

- **OUT_RUNOF:** Escorrentía superficial.
- **OUT_BASEFLOW:** Flujo base o escorrentía subsuperficial.
- **EVAP_BARE:** Evaporación suelo desnudo.
- **EVAP_CANOPY:** Evaporación del agua interceptada en el follaje.
- **TRANS_VEG:** Transpiración de la planta
- **OUT_EVAP:** Evapotranspiración (ET), correspondiente a la suma de *EVAP_BARE*, *EVAP_CANOPY* y *TRANS_VEG*. y es calculada con resistencia nula (parámetro *Rarc* nulo).
- **OUT_PETNAT_VEG:** Evapotranspiración potencial (PET), calculada según la ecuación de la ET pero considerando los parámetros *Rarc* y *LAI* asociados a cada cultivo, sin limitaciones hídricas y déficit de presión de vapor.

En base a lo anterior, el valor de la escorrentía (*E*) se define según la ecuación 4.6.

$$E = OUT_RUNOF + OUT_BASEFLOW \quad (4.6)$$

Al simular a nivel de cuenca, al valor de escorrentía presentando en la Ecuación 4.6 se le añade el caudal glaciar, obtenido a partir del trabajo DGA (2018).

Luego, para la estimación de la demanda evapotranspirativa (DE) asociada al riego, se utiliza la diferencia entre PET y ET , de acuerdo con la Ecuación 4.7:

$$DE = OUT_{PETNAT_VEG} - OUT_{EVAP} \quad (4.7)$$

4.4 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS VEGETACIONALES.

Se realizaron dos tipos de análisis de los parámetros vegetacionales del modelo VIC. En el primer análisis se estudian la sensibilidad los parámetros vegetaciones siguientes: $Rmin$, $Rarc$, RGL , Rad_atten , $Trunk_atten$, $altura\ del\ cultivo$, $Root_depth$ y $Root_fraction$, en la escorrentía (E), evapotranspiración (ET) y evapotranspiración potencial (PET). Mientras que el segundo análisis, tiene como objetivo analizar de manera conjunta de LAI y $Rmin$, el efecto de dichos parámetros en la demanda evapotranspirativa, ya que según la Revisión bibliográfica se estimó alta variación de estos parámetros.

Para ambos análisis se considera una única celda ubicada en un sector agrícola con un gran número de predios catastrados, de modo que la sensibilidad no tenga otros factores de cambio, como la distribución de parámetros de suelo y/o las forzantes meteorológicas históricas.

4.4.1 Primer análisis de sensibilidad general

El primer análisis se realiza en los parámetros vegetaciones fijos del modelo, lo que excluye a los parámetros $albedo$ y el LAI , esto debido a que se requiere un único valor base para la metodología adoptada. A partir de este análisis, se busca identificar los parámetros de vegetación más sensibles en el sistema, en particular en las variables E , ET y PET . Para ello se seleccionaron los parámetros del cultivo tomate industrial como valores base, con lo cual se realiza una simulación en el modelo VIC. Luego, se realiza por cada parámetro una simulación, en donde se perturba el valor del parámetro un 10% con respecto a su valor base, manteniendo los demás fijos.

Para analizar la sensibilidad de los parámetros de vegetación, se emplea el índice de sensibilidad DELSA de primer orden (Rakovec et al., 2013), utilizando los valores anuales del periodo histórico (1985-2014) de las variables de salidas ET , PET y E , en mm. El índice de sensibilidad DELSA para el parámetro j , se define a partir de las ecuaciones 4.8, 4.9 y 4.10, donde S_{L1}^j representa la fracción de la varianza total de orden 1 del parámetro j .

Índice de sensibilidad DELSA:

$$S_{L1}^j = \frac{\left| \frac{\partial \psi}{\partial \theta_j} \right|_l^2 \cdot S_j^2}{V_L(\psi)} \quad (4.8)$$

Gradiente local de la función objetivo:
(ET , PET o E).

$$\frac{\partial \psi}{\partial \theta_j} \approx \frac{\psi(\theta_j + 0,1 \cdot \theta_j) - \psi(\theta_j)}{0,1 \cdot \theta_j} \quad (4.9)$$

Varianza a priori del parámetro j:

$$S_j^2 = \frac{1}{12} \cdot (\theta_{j,max} - \theta_{j,min})^2 \quad (4.10)$$

Para aplicar esta metodología se tiene como función objetivo los valores anuales de la *ET*, *PET* y *E* en el periodo (1985-2014). Para estimar la varianza a priori, se utiliza los rangos de los valores de los parámetros del cultivo Tomate industrial, lo cual es investigado en este trabajo para la zona de estudio.

4.4.2 Primer análisis de sensibilidad para *LAI* y *Rmin*.

Este segundo análisis se realiza con el fin de identificar cuál de los parámetros será más importante de definir para futuras simulaciones. En la revisión bibliográfica, según Dickinson et al. (1993) el *Rmin* presenta una alta variación debido a factores como la clase de cultivo, el tipo de riego y clima, entre otros. Mientras que *LAI* presentan diferencias significativas en cultivos de clases similares según Breuer et al. (2003). En particular, en el *LAI*, un aspecto que produce variación en su estimación mediante información satelital es la edad de los árboles, lo que genera un distinto desarrollo para cultivos de una misma clase.

Este análisis se realiza para cuatro cultivos específicos (tomate industrial, maíz, duraznero conservero y palto). Para cada uno de estos cultivos, dado que se conoce el rango de *Rmin*, se definen 10 valores linealmente distribuidos en este rango. Y para el *LAI*, se obtienen 10 valores de cada set mensual, al considerar un cambio de 0,1 en cada nivel con respecto a su valor base. De este modo, se creó un set de 10 x 10 simulaciones por cada set de cultivo, de modo que la simulación (i, j) queda determinada por un *Rmin* en el valor “i” del rango y por un *LAI* igual al valor “j” del intervalo.

4.5 RESPUESTA HIDROLÓGICA DE LOS CULTIVOS EN LA ZONA DE ESTUDIO

El análisis de la respuesta hidrológica se realizó en tres etapas, la Etapa I corresponde a obtener la respuesta hidrológica del set de 40 cultivos, la Etapa 2 calcula las zonas óptimas de dichos cultivos y la Etapa 3 comprende la agrupación de los cultivos de acuerdo con su respuesta hidrológica.

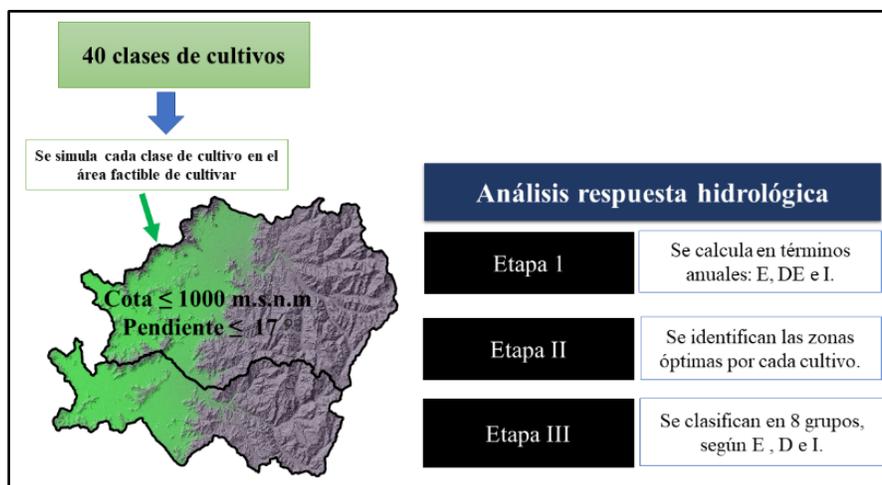


Figura 4.3: Diagrama sobre metodología de análisis de respuesta hidrológica.

Etapa I - Cálculo de la respuesta hidrológica de los cultivos.

Se hace un análisis de la respuesta hidrológica de las 40 clases de cultivos mediante simulaciones con el modelo VIC, con el fin de realizar una comparación entre los flujos de salidas para los distintos tipos de cultivo. Para ello, se realizaron los siguientes pasos:

1. Se simula cada cultivo en todas aquellas celdas factibles de cultivar, para lo cual se define como límite la cota ≤ 1000 [m.s.n.m] y el límite erosivo de 17° de pendiente. La selección de la cota es debido a que no se aprecian predios agrícolas por sobre esta cota, y se reduce la profundidad de suelo, necesaria para algunas especies. Mientras que la elección de la pendiente de 17° , es debido a que representa un límite erosivo para el suelo de los cultivos según García (1954). Con ello, las celdas factibles de cultivar son 114 de un total de 190 en la subcuenca de Tinguiririca y de 157 de un total de 292 para la subcuenca de Cachapoal. Este mismo procedimiento se aplica tanto para las forzantes históricas, como para las forzantes futuras asociadas a los cuatro GCMs.
2. Las variables de salida a analizar corresponden a la escorrentía y la demanda evapotranspirativa media anual y el índice de aridez (PET/P). Luego para cada cultivo, se calcula el valor promedio entre las celdas factibles de cultivar y el promedio de los años analizados según el set de forzantes: desde 1985 al 2014 para las forzantes históricas y desde 2015 al 2059 para las forzantes futuras. Cabe agregar que para calcular el valor anual de las variables se utilizó el año hidrológico (de abril a marzo).

Etapa II: Zona óptima de los cultivos.

Se desea conocer la zona óptima de ubicación de un cultivo, lo que se define en este estudio como celdas en donde se obtiene una demanda evapotranspirativa menor al promedio obtenido entre todas las celdas factibles de cultivar. Para ello se realizan los siguientes pasos:

1. Se utiliza las simulaciones realizadas en la Etapa I, en donde se simulan todas las celdas factibles de cultivar con un único cultivo, repitiendo este procedimiento para el resto de los cultivos.
2. Luego al obtener la demanda evapotranspirativa de cada celda, se comparan entre sí, y con ello identificar las zonas óptimas por cultivo, tanto para el periodo histórico como el periodo futuro.
3. Para la definición de zonas óptimas en los escenarios futuros, se emplean las forzantes futuras, y se utiliza el resultado común a los 4 GCMs.

Etapa III: Definición de grupos de cultivos según respuesta hidrológica.

Se busca agrupar los 40 cultivos de acuerdo con su respuesta hidrológica. Para ello se aplica una metodología de clasificación conocida como K-means, el cual es un algoritmo de clasificación no supervisada que agrupa objetos en k grupos basándose en sus características.

El algoritmo K-means genera grupos aleatorios a partir de los datos de los elementos a clasificar y la definición previa del número de grupos. Con ello, el algoritmo asigna aleatoriamente los grupos, de modo que los elementos de cada grupo no se interceptan. Luego el algoritmo retorna el valor del centroide de cada grupo, para cada set de datos ingresados. Con ello, se calcula la distancia euclidiana entre el valor de cada cultivo y el centroide de su grupo asignado. Luego, al aplicar un número importante de simulaciones, se concluye la agrupación que permite que los elementos de un mismo grupo posean la menor varianza. Para ello, se minimiza la varianza, lo cual comprende aplicar la Ecuación 4.11.

$$\min_{C_1, C_2, \dots, C_k} \left[\sum_{k=1}^k W(C_k) \right] \quad (4.11)$$

Donde W corresponde a la distancia euclidiana al cuadrado, que se define de acuerdo con la Ecuación 4.12.

$$W(C_k) = \frac{1}{|C_k|} \cdot \sum_{i,i'}^P \sum_{j=1}^P (X_{ij} - X_{i'j})^2 \quad (4.12)$$

Donde:

- k : Número de iteraciones.
- P : Número de grupos.
- X_{ij} : Valor propiedad i del grupo j .
- $X_{i'j}$: Valor centroide de la propiedad i del grupo j .
- $|C_k|$: Número de elementos del grupo k .

Para aplicar esta metodología, se realizaron los siguientes pasos.

1. Se seleccionan tres propiedades que determinan la clasificación, las cuales son: escorrentía (E), demanda evapotranspirativa (DE) e índice de aridez (PET/P).
2. Luego, se comienza a simular asignando distintos números de grupos, para analizar cómo cambia la distancia euclidiana entre los elementos. Se selecciona un máximo de 30 mm como distancia euclidiana máxima del valor de DE , por lo cual se optó por definir 8 grupos.
3. Con la elección de número de grupos, se realizaron 10.000 iteraciones de la función K-means, de modo de asegurar la convergencia. Para cada iteración se genera una asignación de grupos y se conoce la distancia euclidiana entre sus elementos. Con ello, se identifica la asignación de grupos que reporta una distancia euclidiana menor por cada grupo.

4.6 ESCENARIOS FUTUROS PLANTEADOS

4.6.1 Definición de los criterios para definir los escenarios futuros.

Para la creación de los escenarios futuros a evaluar, se trabaja con el archivo del modelo VIC denominado “veg_param” por el grupo UW Hydro Computational Hydrology de la Universidad de Washington. En el archivo “vegparam” se define para cada celda i : el número de clases que se encuentran en la celda i y la fracción ocupada por cada clase n dentro de la celda i . Y por cada clase n de la celda i , se define: el valor de los parámetros $Root_deph$ y $Root_fraction$ para cada una de las tres capas de suelo, y los valores mensuales del LAI .

Recapitulando, para el caso del CBC la fracción en que se distribuyen los cultivos se presenta en la Tabla 4.1, sin embargo, estas fracciones se distribuyen homogéneas en cada celda, por lo que no se definen ubicaciones de los cultivos en distintas celdas, y por su parte, el área cultivada comprende el área de cultivo de Zhao et al. (2016). En cambio, para la definición de escenarios futuros se consideran tres criterios: fracción óptima, áreas máximas en la que se distribuyen estos cultivos y zonas óptimas. Con

estos tres factores de diseño se busca plantear los escenarios futuros a simular. A continuación, se presentan una descripción de la metodología de cada aspecto de diseño.

a) Fracción óptima

Se desea obtener una distribución de cultivos que sea óptima para el periodo futuro, lo cual significa en este trabajo que se cultivan en mayor cantidad los cultivos de menor demanda evapotranspirativa y en menor medida los cultivos de mayor demanda. Las fracciones iniciales, que representan el caso base son las del CBC, las cuales se presentan en la Tabla 4.1. Para obtener la fracción óptima por cultivo, se realizan los siguientes pasos.

1. A partir de definición de grupos, se calcula la fracción total que tiene cada grupo en el CBC.
2. Luego se ordenan los grupos según su demanda evapotranspirativa, donde el grupo 1 es el más demandante y el 8 el menos demandante. Con ello, se define la reducción de la fracción de los grupos que son demandantes y que poseen alto porcentaje de cultivo según el CBC, y de la misma manera se aumentan las fracciones de los grupos con menor demanda evapotranspirativa. De este modo se logra redistribuir las fracciones de manera lineal según su demanda evapotranspirativa
3. Finalmente, la fracción de cada grupo se distribuye de manera homogénea en los cultivos que posee.

b) Zona óptima de cultivo

Para los escenarios futuros, los cultivos se distribuyen espacialmente entre celdas según la zona óptima futura a la que pertenecen, con el fin de reducir la demanda evapotranspirativa, la cual es la zona óptima común derivada de las forzantes futuras de los cuatro GCMs.

c) Máximas áreas de cultivo

En primer lugar, se plantean áreas de acuerdo con la pendiente máxima de 7°, 11° y 17°, asociada a 12%, 20% y 30% por ciento de pendiente, respectivamente. Se utilizan estos límites, debido a que en 12% de pendiente se inicia la erosión del terreno y en 30% se establece el límite erosivo según el trabajo de García (1954).

Las pendientes y sus áreas asociadas son calculadas en QGIS para cada subcuenca a partir del modelo de elevación ALOS PALSAR. Dependiendo de la subcuenca, estos valores pueden ser mayores o menores al CBC. Luego teniendo en cuenta que la celda de simulación es de 0,05° grados (Sistema WGS84), se realiza una intercepción entre celdas de dicho tamaño, y los polígonos de área de cada pendiente, con lo cual se calcula el área que cubre cierto límite de pendiente por celda, mediante calculadora de campos de QGIS.

Luego, al tener en cuenta que se espera una reducción de precipitaciones para el periodo futuro, se establecen escenarios de mayor reducción de área, los cuales son R25 y R40, de un 25% y de un 40% de reducción del área con respecto al CBC, respectivamente.

4.6.2 Descripción escenarios futuros.

Cada uno de los escenarios planteados se definen por subcuenca, los cuales pueden tener una distribución óptima de cultivos o la distribución base del CBC, y pueden ubicarse en zonas óptimas o completar todas

las celdas disponibles dadas por su área máxima. En la Figura 4.4 se presenta un diagrama de cómo se definieron estos escenarios, clasificados de acuerdo con la distribución de cultivos adoptada.

En la distribución de cultivos del Censo 2007 se tiene los escenarios CBC y S17_CBC, donde el primero es el caso base histórico y el segundo es una proyección de aumento de área hasta el límite de 17° de pendiente. En ambos casos, se emplean todas las celdas disponibles, incluyendo celdas óptimas y no óptimas.

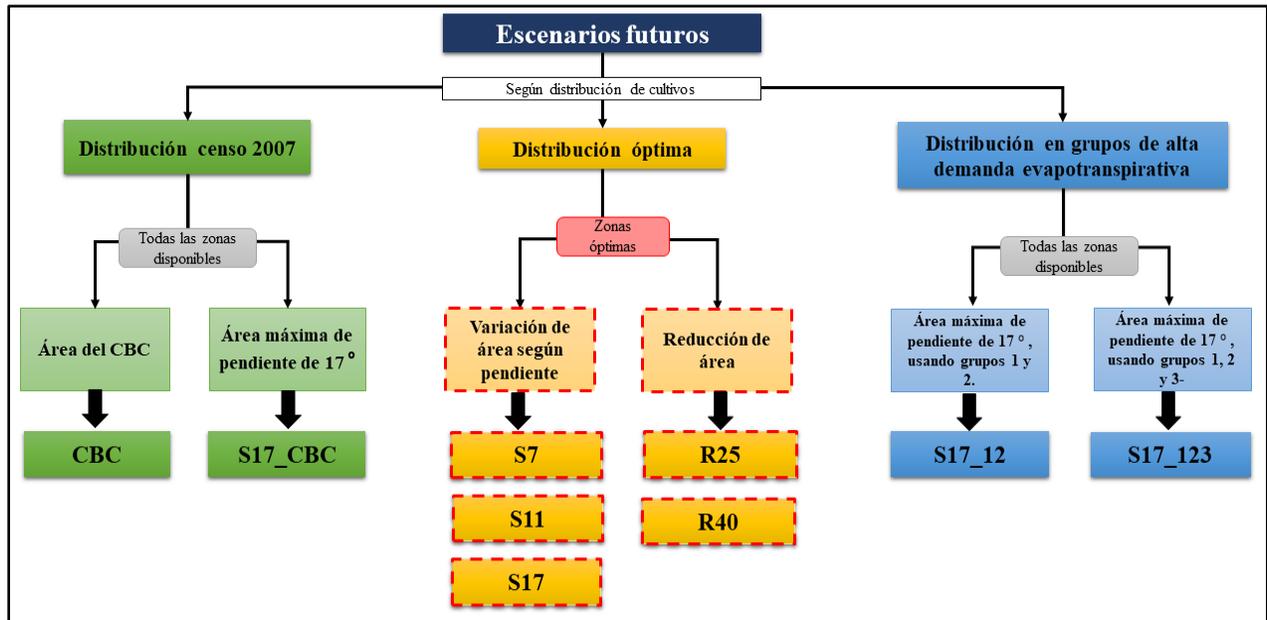


Figura 4.4: Diagrama definición escenarios futuros.

En la distribución óptima de cultivo, se tiene los escenarios de área máxima dada por las pendientes de 7° (S7), de 11° (S11) y de 17° (S17), los cuales solo consideran las celdas óptimas presente en su área máxima.

Además, se plantean dos escenarios de reducción de área de cultivo: reducción de un 25% (R25) y de un 40% (R40) con respecto al área cultivada del CBC. En estos escenarios, al igual que S7, S11 y S17, se emplean solo celdas óptimas, pero ubicadas hasta la pendiente de 7°, de modo de privilegiar las zonas planas, de mayor acceso.

Finalmente, se utiliza la distribución en grupos de alta demanda evapotranspirativa, donde se emplea el área total disponible hasta la pendiente de 17°, considerando celdas óptimas y no óptimas. Donde el escenario S17_12 posee los cultivos del grupo 1 y 2, y el escenario S17_g123 emplea los cultivos de los grupos 1, 2 y 3, donde el grupo 1 es el más demandante y el 8 el menos demandante.

4.6.3 Análisis de resultados de los escenarios planteados.

Para el análisis de los resultados de derivados de los escenarios futuros, se analiza la demanda evapotranspirativa y escorrentía en términos anuales y mensuales, comparando además los cambios en los periodos (2015-2039 y 2040-2059) con respecto al periodo histórico (1985-2014).

Luego se analiza en términos de volumen anual y se compara la disponibilidad hídrica dada por la esorrentía proyectada versus la demanda hídrica total, la cual corresponde a la suma de la demanda evapotranspirativa simulada en el modelo VIC y de los derechos de agua asociadas a otros usos. Para ello se trabaja con suma anual de derechos superficiales consuntivos de la zona de estudio, lo cual fue adquirido a partir del trabajo “Diagnóstico de la información de derechos de agua en Chile Continental” (Budde et al., 2018).

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se representan los resultados en el siguiente orden: 5.1- Parámetros vegetacionales del modelo, 5.2- Análisis para determinar fracciones óptimas, 5.3- Variación de la demanda según zona geográfica, 5.4- Análisis evapotranspiración natural y evapotranspiración potencial, y 5.5- Resultados escenarios futuros.

5.1 PARÁMETROS VEGETACIONALES DEL MODELO

5.1.1 Parámetros vegetacionales que varían mensualmente.

En las Figura 5.1 y Figura 5.2 se muestra la variación mensual de los parámetros estimados según imágenes satelitales Landsat 8 (*LAI* y *albedo*), para las hortalizas - anuales, y para los frutales - viñedos, respectivamente.

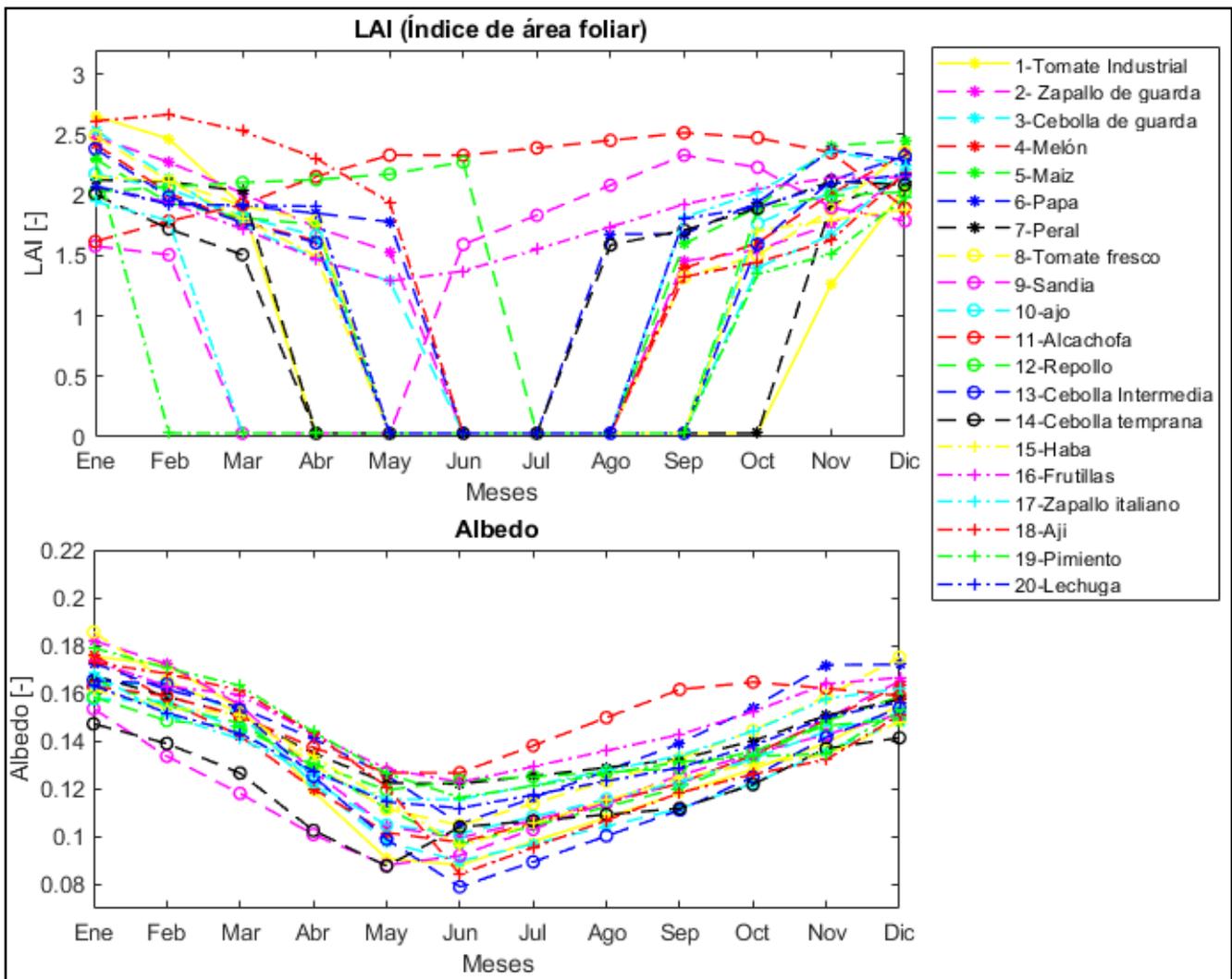


Figura 5.1 Parámetros estimados según imágenes satelitales Landsat 8 – Hortalizas y Anuales

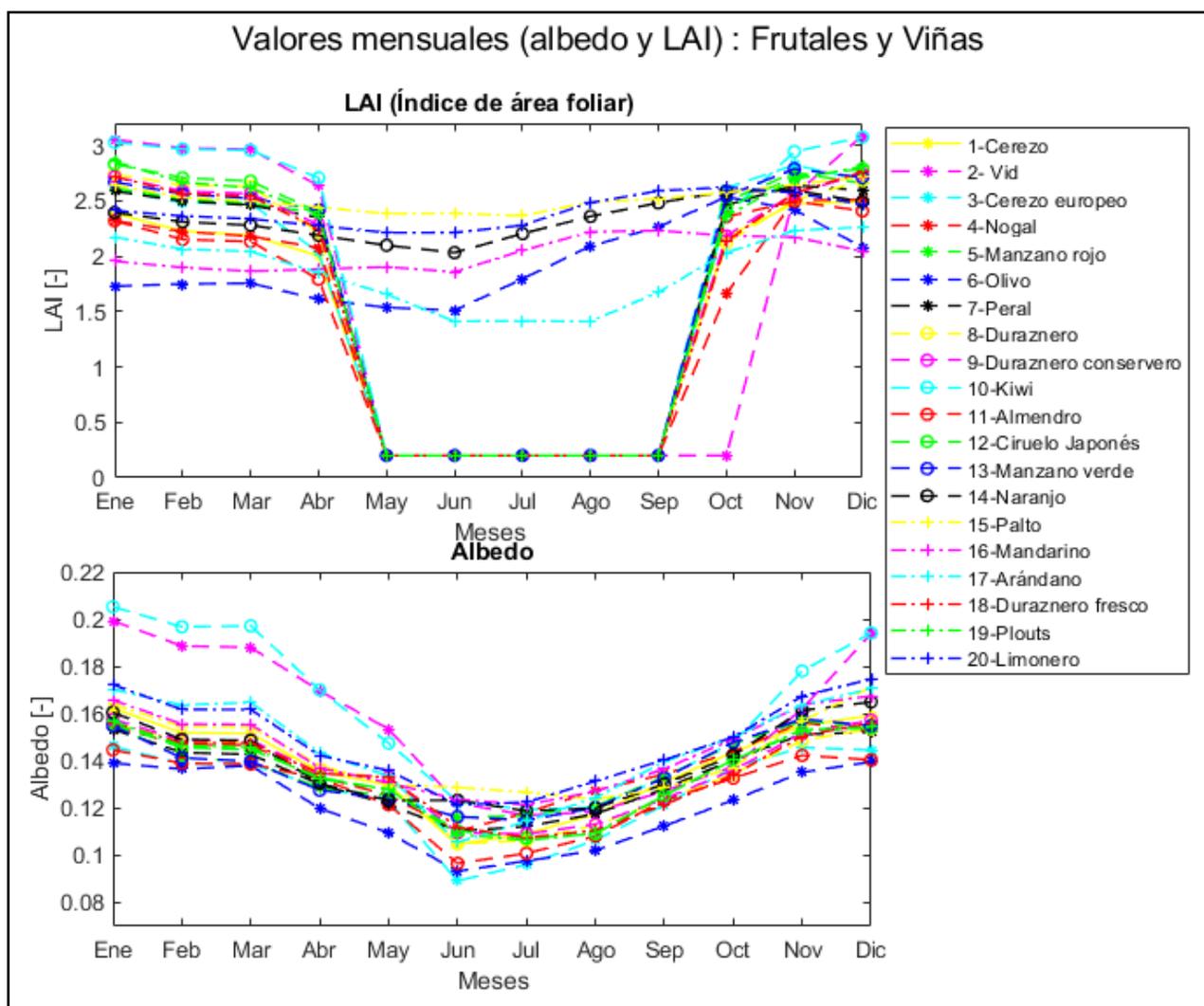


Figura 5.2 Parámetros estimados según imágenes satelitales Landsat 8 - Frutales y viñedos.

En estas figuras se observa que el *albedo* de los cultivos presenta un rango entre 0,09 hasta 0,2, apreciando diferencias entre los cultivos, lo cual es captado por las imágenes satelitales utilizadas. De la misma forma, el *LAI* presenta diferencias entre cultivos, con un intervalo 0 hasta 2,5 para el caso de hortalizas, y de 0 a 3 para el caso de frutales y viñedos. Además, se identifican las estaciones de siembra y cosecha de las hortalizas. En el caso de los frutales, también se observa una diferencia entre los cultivos perennes y caducos. Cabe mencionar que cada uno de los cultivos se comparó con las fechas de siembra y cosecha, y en el caso de los frutales y viñedos se identificaron los meses en que los árboles caducos pierden sus hojas. Debido a que se esperaba un *LAI* mucho más bajo, se llevó el valor estimado por las imágenes satelitales a un valor cercano a 0 en los meses caducos o sin cultivo.

En Anexo A se presenta una tabla con los valores mensuales de los parámetros: *LAI*, *albedo*, *rugosidad* y *desplazamiento*.

5.1.2 Parámetros vegetacionales fijos del modelo

En este ítem se presentan parámetros vegetaciones investigados según bibliografía, para el set de 40 cultivos. En la Tabla 5.1 se presenta *Rmin* y en Tabla 5.2 la altura máxima de los cultivos, con las fuentes respectivas. En la Tabla 5.3 se presenta el parámetro *Trunk_ratio*, el cual es un valor supuesto de acuerdo con la observación de la morfología de las plantas. Y en la Tabla 5.4 se presentan los valores de *Root Depth* y *Root Fraction* para cada cultivo.

Tabla 5.1: *Rmin* (Resistencia mínima del follaje): valores y fuentes.

Cultivo	Valor mínimo [s/m]	Valor máximo [m/s]	Fuente
Tomate Industrial	250	300	Boulard, Jemaa y Baille (1996)
Zapallo de guarda	150	230	Augé et al., 2008
Cebolla de guarda	116	118	Bolandnazar et al. (2007)
Melón	140	150	Melo et al. (1995)
Choclo	50	100	Subramanian et al. (1995)
Papa	50	80	Hammes y Jager (1990); Apotikar et al. (2012)
Tomate consumo fresco	250	300	Bar-Tsur, Rudich y Bravdo (1985)
Sandía	140	150	Melo et al. (2010)
Ajo	93,2	128,15	Léllis et al. (2016)
Poroto Granado	150	170	Poschenrieder, Gunse y Barcelo (1989)
Alcachofa	30	70	Shinohara & Leskovar (2014)
Repollo	80	200	Dorne & Bligny (1993)
Cebolla Intermedia	116	118	Bolandnazar et al. (2007)
Cebolla Temprana	116	118	Bolandnazar et al. (2007)
Haba	150	170	Poschenrieder, Gunse y Barcelo (1989)
Frutilla	110	250	Renquist, Breen y Martin (1982)
Zapallo italiano	150	230	Augé et al. (2008)
Ají	160	200	Horton & Wierenga (1982)
Pimiento	160	200	Horton & Wierenga (1982)
Lechuga	40	80	Alves & Pereira (2000)
Cerezo	100	115	Fredericksen et al. (1996); Takanari, Keniche y Yoshikazu (2005)
Vid de mesa	100	200	Liu et al. (1978)
Ciruelo europeo	120	160	Chootummatat et al. (1990)
Nogal	100	130	Rosati et al. (2006)
Manzano rojo	170	220	Fujii & Kennedy (1985)
Olivo	50	300	Masmoudi et al. (2010)
Peral	130	200	Caspari et al. (1993)

Cultivo	Valor mínimo [s/m]	Valor máximo [m/s]	Fuente
Duraznero tipo conservero	110	150	Garnier & Berger (1987)
Nectarino	110	150	Garnier & Berger (1987)
Kiwi	110	300	Green, McNaughton y Clothier (1989)
Almendro	160	190	Dettori (1984)
Ciruelo Japonés	120	160	Chootummatat, Turner y Cripps (1990)
Manzano verde	200	220	Fujii & Kennedy (1985)
Naranja	100	200	Hall, Camacho-B y Kaufmann (1975)
Palto	80	200	(Bower, Wolstenholme y De Jager (1977) ; Bower (1978)
Mandarino	100	200	Hall, Camacho-B & Kaufmann (1975)
Arándano americano	100	200	Erb, Draper y Swartz (1991)
Duraznero consumo fresco	110	150	Garnier & Berger (1987)
Pluots	120	160	Chootummatat, Turner y Cripps (1990)
Limonero	100	200	Hall, Camacho-B y Kaufmann (1975)
Bosques, pastizales matorrales	200	200	Dickinson et al. (1993)

Tabla 5.2: Valores de la altura máxima de los cultivos y sus fuentes.

Cultivo	Altura máxima [m]	Fuente
Tomate Industrial	0,6	Allen et al. (2006)
Zapallo de guarda	0,4	Allen et al. (2006)
Cebolla de guarda	0,4	Allen et al. (2006)
Melón	0,3	Allen et al. (2006)
Choclo	2	Allen et al. (2006)
Papa	0,6	Allen et al. (2006)
Tomate consumo fresco	0,6	Allen et al. (2006)
Sandía	0,4	Allen et al. (2006)
Ajo	0,3	Allen et al. (2006)
Poroto Granado	0,4	Allen et al. (2006)
Alcachofa	0,7	Allen et al. (2006)
Repollo	0,4	Allen et al. (2006)
Cebolla Intermedia	0,4	Allen et al. (2006)
Cebolla Temprana	0,4	Allen et al. (2006)
Haba	0,8	Allen et al. (2006)
Frutilla	0,2	Allen et al. (2006)

Cultivo	Altura máxima [m]	Fuente
Zapallo italiano	0,3	Allen et al. (2006)
Ají	0,5	Allen et al. (2006)
Pimiento	0,7	Allen et al. (2006)
Lechuga	0,3	Allen et al. (2006)
Cerezo	4	Allen et al. (2006)
Vid de mesa	1,5 a 2	Allen et al. (2006)
Ciruelo europeo	3	Allen et al. (2006)
Nogal	4,0-5,0	Allen et al. (2006)
Manzano rojo	4	Allen et al. (2006)
Olivo	3,0-5,0	Allen et al. (2006)
Peral	4	Allen et al. (2006)
Duraznero tipo conservero	3	Allen et al. (2006)
Nectarino	4	Allen et al. (2006)
Kiwi	3	Allen et al. (2006)
Almendro	5	Allen et al. (2006)
Ciruelo Japonés	3	Allen et al. (2006)
Manzano verde	4	Allen et al. (2006)
Naranja	4	Allen et al. (2006)
Palto	3	Allen et al. (2006)
Mandarino	4	Allen et al. (2006)
Arándano americano	1,5 - 1,8	(Undurraga, y Vargas, 2013)
Duraznero consumo fresco	3	Allen et al. (2006)
Pluots	3	Allen et al. (2006)
Limonero	4	Allen et al. (2006)

Tabla 5.3: Supuestos fracción de tronco libre de ramas/hojas (parámetro *Trunk_ratio*)

Cultivo	Trunk ratio [-]
Tomate Industrial	0,1
Zapallo de guarda	0,05
Cebolla de guarda	0,05
Melón	0,05
Choclo	0,2
Papa	0,05
Tomate consumo fresco	0,1
Sandía	0,05

Cultivo	Trunk ratio [-]
Ajo	0,05
Poroto Granado	0,05
Alcachofa	0,05
Repollo	0,05
Cebolla Intermedia	0,05
Cebolla Temprana	0,05
Haba	0,05
Frutilla	0,05
Zapallo italiano	0,05
Ají	0,05
Pimiento	0,05
Lechuga	0,05
Cerezo	0,2
Vid de mesa	0,5
Ciruelo europeo	0,2
Nogal	0,25
Manzano rojo	0,2
Olivo	0,2
Peral	0,2
Duraznero tipo conservero	0,2
Nectarino	0,2
Kiwi	0,5
Almendro	0,2
Ciruelo Japonés	0,2
Manzano verde	0,2
Naranja	0,2
Palto	0,2
Mandarino	0,2
Arándano americano	0,1
Duraznero consumo fresco	0,2
Pluots	0,2
Limonero	0,2

Tabla 5.4: Root Depth y Root fraction (Profundidad y fracción de raíces por capa): valores y fuentes.

Cultivo	Root depth 1	Root fraction 1	Root depth 2	Root fraction 2	Root depth 3	Root fraction 3	Fuente
Tomate Industrial	0,1	0,14	0,4	0,84	0,3	0,03	Rosário, Calado y Portas (1996); Machado & Rosário (2005)
Zapallo de guarda	0,1	0,49	0,1	0,21	0,2	0,31	Zhang et al, (2009)
Cebolla de guarda	0,305	0,5	0,305	0,4	0,305	0,1	Weaver & Bruner (1927)
Melón	0,153	0,45	0,153	0,45	0,305	0,1	Weaver & Bruner (1927)
Choclo	0,458	0,6	0,305	0,35	0,458	0,05	Weaver & Bruner (1927)
Papa	0,15	0,37	0,15	0,54	0,3	0,09	Lesczynski & Tanner (1976)
Tomate consumo fresco	0,1	0,14	0,4	0,84	0,3	0,03	Rosário, Calado y Portas (1996); Machado & Rosário (2005)
Sandía	0,1	0,51	0,1	0,35	0,5	0,14	NeSmith (1999)
Ajo	0,1	0,45	0,1	0,45	0,2	0,1	INDAP (2019)
Poroto Granado	0,305	0,6	0,305	0,3	0,305	0,1	Weaver & Bruner (1927)
Alcachofa	0,3	0,35	0,3	0,35	0,3	0,3	Garcilazo (2014)
Repollo	0,6	0,77	0,305	0,18	0,6	0,05	Weaver & Bruner (1927)
Cebolla Intermedia	0,305	0,5	0,305	0,4	0,305	0,1	Weaver & Bruner (1927)
Cebolla Temprana	0,305	0,5	0,305	0,4	0,305	0,1	Weaver & Bruner (1927)
Haba	0,61	0,67	0,61	0,29	0,61	0,05	Bryla et al, (2003)
Frutilla	0,305	0,64	0,305	0,24	0,305	0,12	Weaver & Bruner (1927)
Zapallo italiano	0,15	0,7	0,3	0,2	0,55	0,1	Zhang et al, (2009)
Ají	0,05	0,64	0,45	0,21	0,5	0,15	Hulugalle & Willatt (1987)
Pimienta	0,1	0,67	0,1	0,3	0,8	0,03	Gough (2001)
Lechuga	0,305	0,58	0,305	0,29	0,305	0,14	Weaver & Bruner (1927)
Cerezo	0,2	0,71	0,3	0,25	1,5	0,04	Li et al, (2019)
Vid de mesa	0,3	0,375	0,3	0,375	1,4	0,25	Zhou et al, (2011)

Cultivo	Root depth 1	Root fraction 1	Root depth 2	Root fraction 2	Root depth 3	Root fraction 3	Fuente
Ciruelo europeo	0,3	0,84	0,3	0,13	2	0,03	Singh & Kaundal (2003)
Nogal	0,4	0,709	0,2	0,255	1,8	0,036	Zhang et al, (2015)
Manzano rojo	0,2	0,7	0,4	0,3	1,4	0,13	Ma et al, (2013)
Olivo	0,2	0,5	0,6	0,368	0,9	0,132	Deng et al, (2017)
Peral	0,2	0,5	0,3	0,34	1,5	0,121	Rufato et al, (2016)
Duraznero tipo conservero	0,1	0,623	0,4	0,344	1,5	0,032	Williamson et al, (1992)
Nectarino	0,15	0,8	0,45	0,133	0,9	0,067	Williamson et al, (1992)
Kiwi	1,0	0,357	2,0	0,405	1,0	0,238	Greaves (1985)
Almendro	0,2	0,267	0,8	0,695	1	0,037	Brown (2014)
Ciruelo Japonés	0,3	0,84	0,3	0,13	2	0,03	Singh & Kaundal (2003)
Manzano verde	0,2	0,7	0,4	0,3	1,4	0,13	Ma et al, (2013)
Naranja	0,15	0,8	0,45	0,133	0,9	0,067	Alves Júnior et al, (2012); Castle (1980)
Palto	0,25	0,748	0,75	0,208	1	0,044	Michelakis et al, (1993)
Mandarino	0,15	0,8	0,45	0,133	0,9	0,067	Alves Júnior et al, (2012); Castle (1980)
Arándano americano	0,15	0,903	0,3	0,065	0,25	0,032	Spiers et al, (1998)
Duraznero consumo fresco	0,1	0,623	0,4	0,344	1,5	0,032	Williamson et al (1992)
Pluots	0,3	0,84	0,3	0,13	2	0,03	Singh & Kaundal (2003)
Limonero	0,15	0,8	0,45	0,133	0,9	0,067	Alves Júnior et al, (2012); Castle (1980)

5.1.3 Análisis de los parámetros vegetacionales del modelo.

a) Índice de sensibilidad DELSA de los parámetros vegetacionales

Para el estudio de la sensibilidad del modelo VIC a los diferentes parámetros vegetacionales, se consideraron los parámetros del tomate industrial como base. Las componentes de interés son: evapotranspiración natural (*ET*), evapotranspiración potencial (*PET*), demanda evapotranspirativa (*DE*) y escorrentía (*E*). Con ello en la Figura 5.3 se presenta el índice de sensibilidad DELSA (Rakovec et al., 2013), para los 8 parámetros vegetaciones fijo del modelo, es decir, sin variación mensual. Además, en el Anexo A.6 se presenta los valores de varianza a priori de cada parámetro.

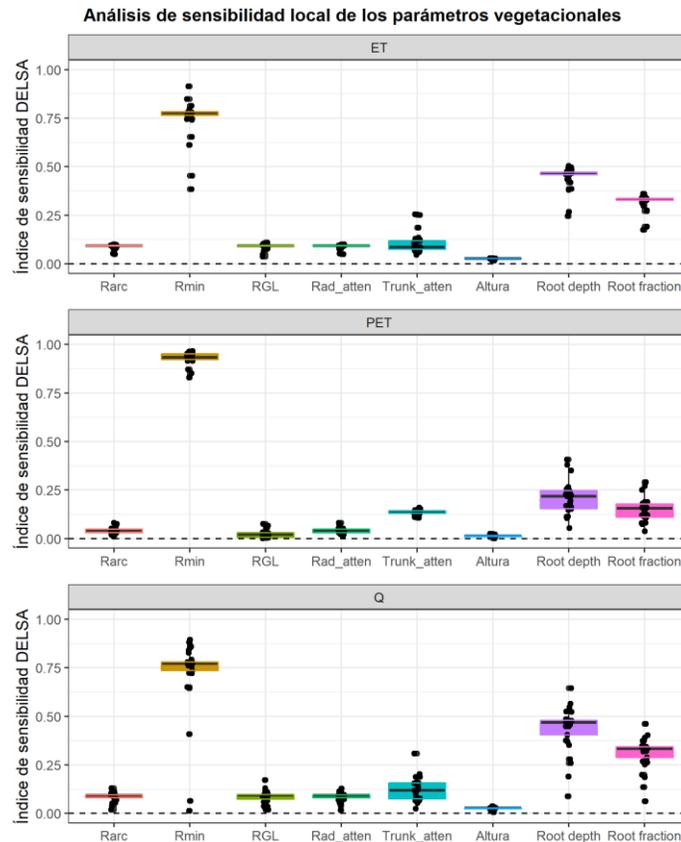


Figura 5.3: 4: Índice de sensibilidad DELSA (Rakovec et al., 2013) aplicado en los parámetros vegetaciones del modelo VIC.

A partir de esta metodología, el *Rmin* corresponde al parámetro más sensible en el modelo, afectando tanto a la *ET*, *PET* y *ET*, con un valor de índice cercano a 1 en la *PET*, y con 0,75 en la *ET* y *E*. El segundo parámetro de mayor índice es el *Root Depth* con un valor de 0,25 a 0,5 en la *ET*, de 0 a 0,5 en la *PET*, y de 0 a 0,7 en la *E*. Luego, el tercer parámetro más sensible es *Root Fraction* con un valor de 0,2 a 0,35 en la *ET*, de 0 a 0,25 en la *PET* y de 0 a 0,5 en la *E*. El cuarto parámetro más sensible, corresponde al *RGL*, que presenta un valor cercano entre 0,1 y 0,25 en *E*, *ET* y *PET*.

Cabe apreciar que *Rad_atten* presenta sensibilidad, debido a que se estable un rango de 0 a 1, sin embargo, este valor no debe ser ajustado en cuencas de latitudes medias.

Por último, señalar que el índice DELSA depende en gran medida de los parámetros base considerados y la variación a priori, por lo que, por dicho motivo, en este trabajo se aplicó este índice a un cultivo en particular, de modo de tener una variación a priori más adecuada. En Anexos A se presenta la tabla con los valores fijos de cada parámetro, el rango adoptado y varianza a priori, considerando que este análisis se realiza para los parámetros propios del tomate industrial.

b) Análisis de la influencia de los parámetros *LAI* y *Rmin* en la demanda evapotranspirativa.

En una segunda parte, para analizar la influencia de los parámetros *LAI* y *Rmin* en la demanda evapotranspirativa, se estudiaron cuatro cultivos para analizar la variación conjunta de dos parámetros vegetacionales, los que corresponden al: tomate industrial, maíz, durazno conservero y palto. Los parámetros, *LAI* y el *Rmin*, son seleccionados debido a ser parámetros vegetacionales de alta variación, según lo analizado en la Revisión bibliográfica. Para esto, se consideran 10 valores de *Rmin*, los cuales corresponden al intervalo en que se encuentra este parámetro para el respectivo cultivo según bibliografía (ver rangos en Tabla 5.1). Luego, se combinan estos valores con los cambios del *LAI* con respecto al valor base adoptado (0 corresponde a la simulación con el valor base adoptado, cuyos valores base se presentan en Figura 5.1 y Figura 5.2).

En la Figura 5.4 se presenta el análisis para el tomate industrial en (A), para el maíz en (B), para el durazno conservero en (C), y para el palto en (D), respectivamente.

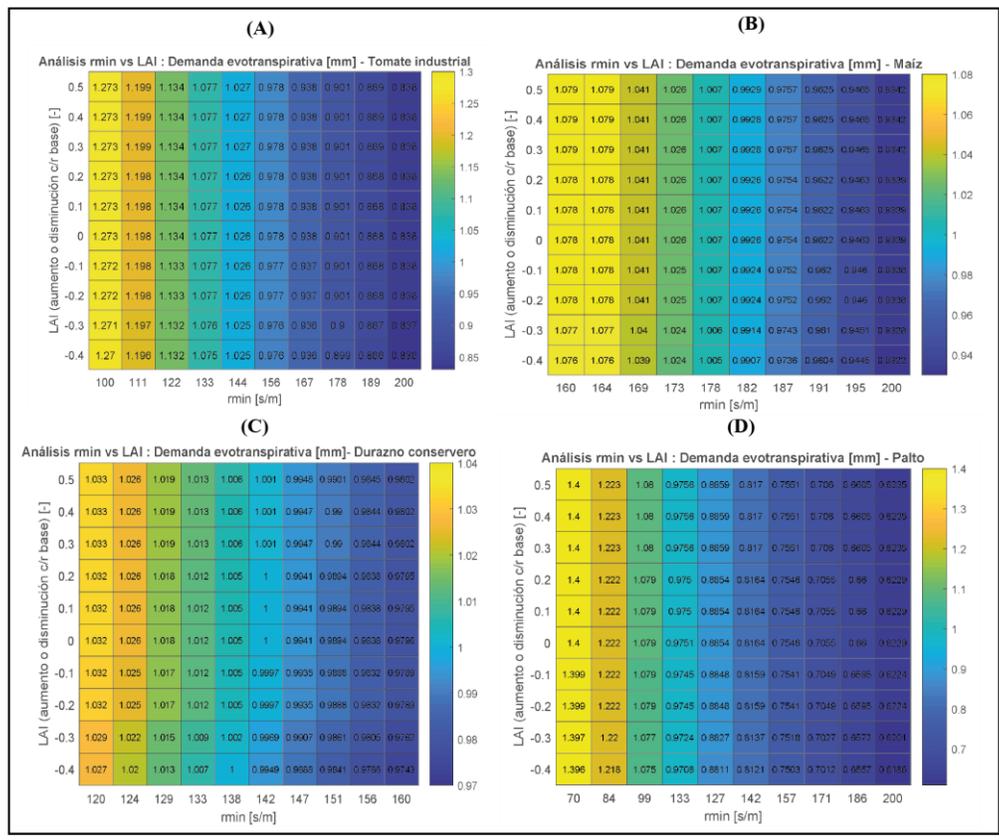


Figura 5.4: Sensibilidad en la demanda evapotranspirativa de los parámetros *LAI* y *Rmin*.

Luego cada celda de los gráficos de la Figura 5.4 muestra: la razón entre la demanda evapotranspirativa anual de la simulación específica (asociada al R_{min} dado por el “eje x”, y el valor de LAI dado por el “eje y”), y la demanda evapotranspirativa asociada a los valores base de R_{min} y LAI adoptados en este trabajo.

En la Figura 5.4, se observa una marcada importancia del valor R_{min} frente a la variación del LAI . Se aprecia que a mayor LAI , mayor es la demanda evapotranspirativa y a menor R_{min} mayor es la demanda evapotranspirativa. Sin embargo, la razón de cambio es notoria en el R_{min} , lo cual tiene sentido con el resultado del índice DELSA, en donde R_{min} resulta ser el más sensible de los parámetros vegetacionales.

5.2 ANÁLISIS PARA DETERMINAR FRACCIONES ÓPTIMAS

5.2.1 Comparación respuesta hidrológicas de los cultivos para las forzantes históricas

A partir de los resultados de la simulación de todas las celdas factibles de cultivar (que comprende el área limitada por la cota 1000 [m.s.n.m] y el límite erosivo de 17° de pendiente de terreno), esto para cada cultivo. La Figura 5.5 muestra la variación anual de las variables: precipitación, escorrentía, evapotranspiración y demanda evapotranspirativa, a lo largo del periodo histórico (1986-2014). Los valores se presentan en mm anuales y representan el promedio de celdas posibles de cultivar en la cuenca.

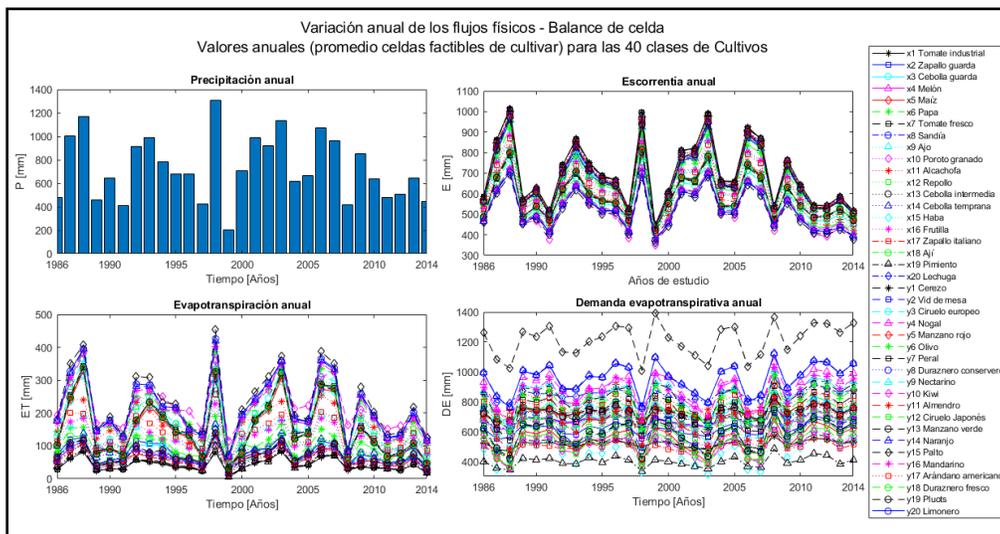


Figura 5.5: Variación anual de las variables P , E , ET y DE – Balance a nivel de celda correspondiente al promedio entre celdas factibles a cultivar.

En la Figura 5.5 se observa cómo la escorrentía va directamente ligada a la disponibilidad de precipitación, y su valor puede variar dentro del set de cultivos, hasta en 300 mm en años húmedos y hasta 100 mm en años secos. La evapotranspiración anual varía de 25 mm hasta 450 mm entre cultivos, y al igual que la escorrentía depende de manera directa de la precipitación, de este modo en años húmedos la evapotranspiración es mayor que en años secos. En cambio, la demanda evapotranspirativa de los cultivos varía desde 350 mm hasta 1250 mm, donde en años secos aumenta la demanda y en años húmedos se reduce.

En la Figura 5.6, se presenta el cociente entre la demanda evapotranspirativa y la escorrentía anual. Y en la Figura 5.7 se presenta el cociente entre la demanda evapotranspirativa y la precipitación.

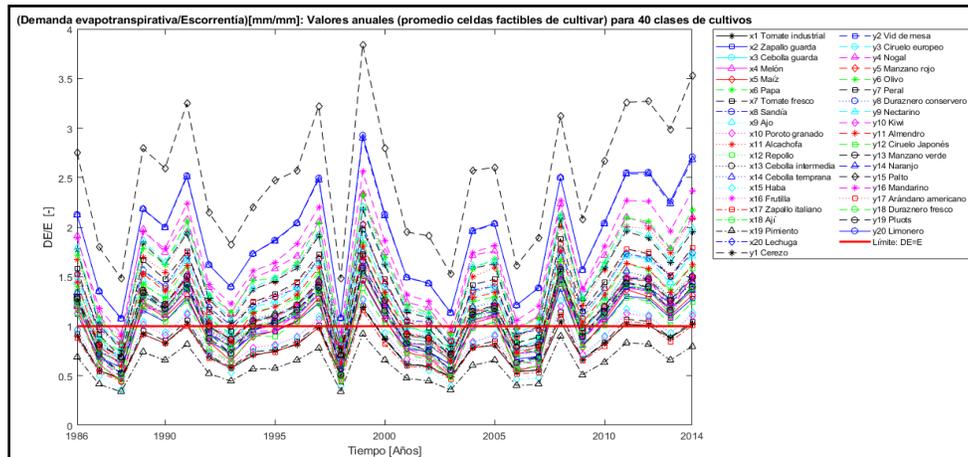


Figura 5.6: Cociente entre demanda evapotranspirativa y escorrentía. Valores anuales para el set de 40 cultivos.

En Figura 5.6 se observa en particular al pimiento, el cual se mantiene bajo a línea roja, por lo que independiente de tener año seco o húmedo, el pimiento podría suplir su demanda a partir de la escorrentía, sin embargo, esto depende del ciclo estacional de las variables hidrológicas, lo que se analiza en los resultados de los escenarios futuros.

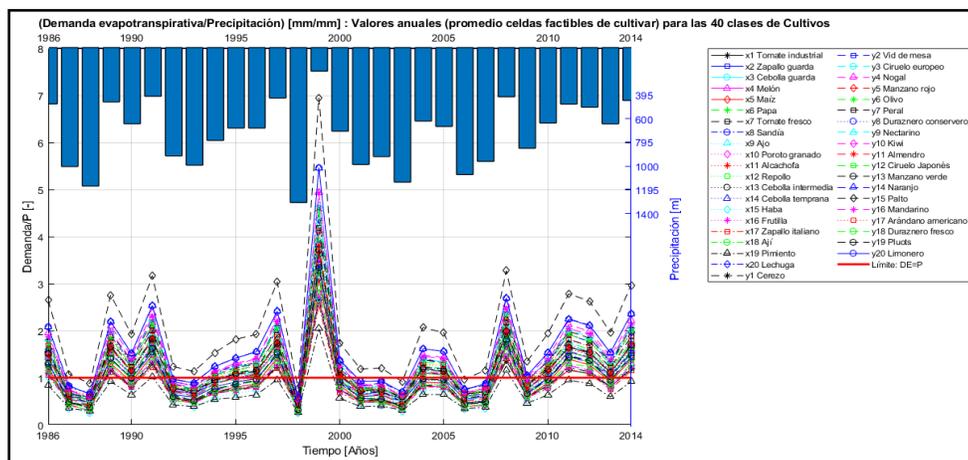


Figura 5.7: Demanda evapotranspirativa /Precipitación. Valores acumulados anuales para el set de 40 cultivos.

En la Figura 5.7, se observa que en los años húmedos como 1987, 1988, 1998, 2006 y 2007, se presenta disponibilidad de precipitación que podría suplir la demanda, sin embargo, esto no se lograría debido a que las necesidades de riego se presentan principalmente los meses de primavera y verano, y la precipitación ocurre en invierno.

5.2.2 Comparación respuesta hidrológicas futura de los cultivos según GCM.

En una segunda parte, en base a la simulación de las celdas factibles de cultivar, se compara el promedio anual de las celdas factibles de cultivar, del periodo futuro (2015-2059) con respecto al periodo histórico (1985-2014), esto para cada GCMs. En la Figura 5.8 , en (A) se presenta la razón entre la demanda evapotranspirativa futura con respecto al periodo histórico. Y en (B) siguiendo el mismo formato, se presenta la comparativa para el caso de la escorrentía.

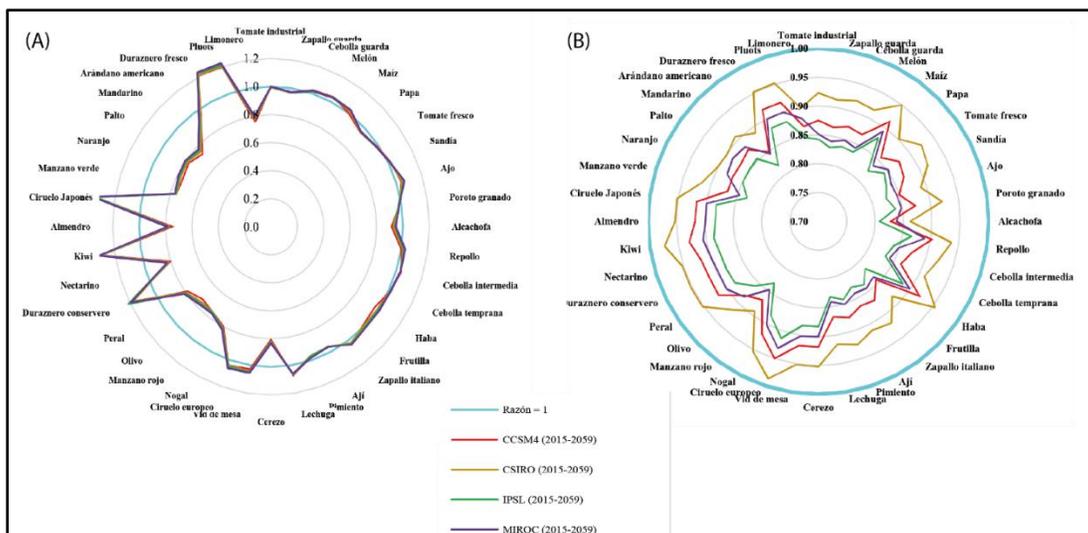


Figura 5.8: (A) Cambio en la demanda evapotranspirativa para la situación futura con respecto a la histórica. (B) Cambio en la escorrentía para la situación futura con respecto a la histórica.

En Figura 5.8 (A), se observa que los cultivos hortícolas presentan poca variación de su demanda futura con respecto al histórica, mientras que en los frutales se presentan cultivos que mantienen, disminuyen o aumentan su demanda evapotranspirativa. Además, se observa una demanda evapotranspirativa que no varía en gran medida por el GCM empleado.

Los cultivos frutales que aumentan su demanda son: Durazno conservero, Kiwi, Ciruelo Japonés, Duraznero fresco y Pluots. Mientras que los cultivos frutales que disminuyen su demanda son: Cerezo, Nogal, Manzano rojo, Olivo, Peral, Nectarino, Almendro, Manzano verde, Naranja, Palto, Mandarin, Arándano Americano y Limonero. Cabe mencionar que el hecho de aumenta o disminuir su demanda en el futuro no significa que sea más el demandante del conjunto, esto se analizará más adelante en la definición de grupos.

En la Figura 5.8 (B) se observa que bajo cualquier tipo de cultivo la escorrentía disminuye de un 5% a 20%, presentando dicha variación del resultado según el GCM utilizado. La disminución de la escorrentía tiene sentido en base a la reducción de la precipitación futura esperada. En esto, se observa que con el IPSL se tiene mayor reducción de la escorrentía y menor reducción con el CSIRO.

5.2.3 Definición de grupos de cultivos.

Se definieron grupos de acuerdo con lo expuesto en la metodología, esto solo para el set de forzantes históricas. Las asignaciones de grupos se presentan en la Figura 5.9, donde en (A) se presenta la demanda

evapotranspirativa anual de cada cultivo como promedio entre celdas factibles de cultivar y promedio anual, ordenados según demanda evapotranspirativa, donde el grupo 1 es el más demandante. Luego en (B) se presenta la escorrentía, ordenados de menor a mayor escorrentía. En barras se presenta el resultado del periodo histórico (1984-2014) y en rombo el resultado en el periodo futuro (2015-2059), mientras que el color corresponde al grupo al cual pertenece, el cual se define según las forzantes históricas.

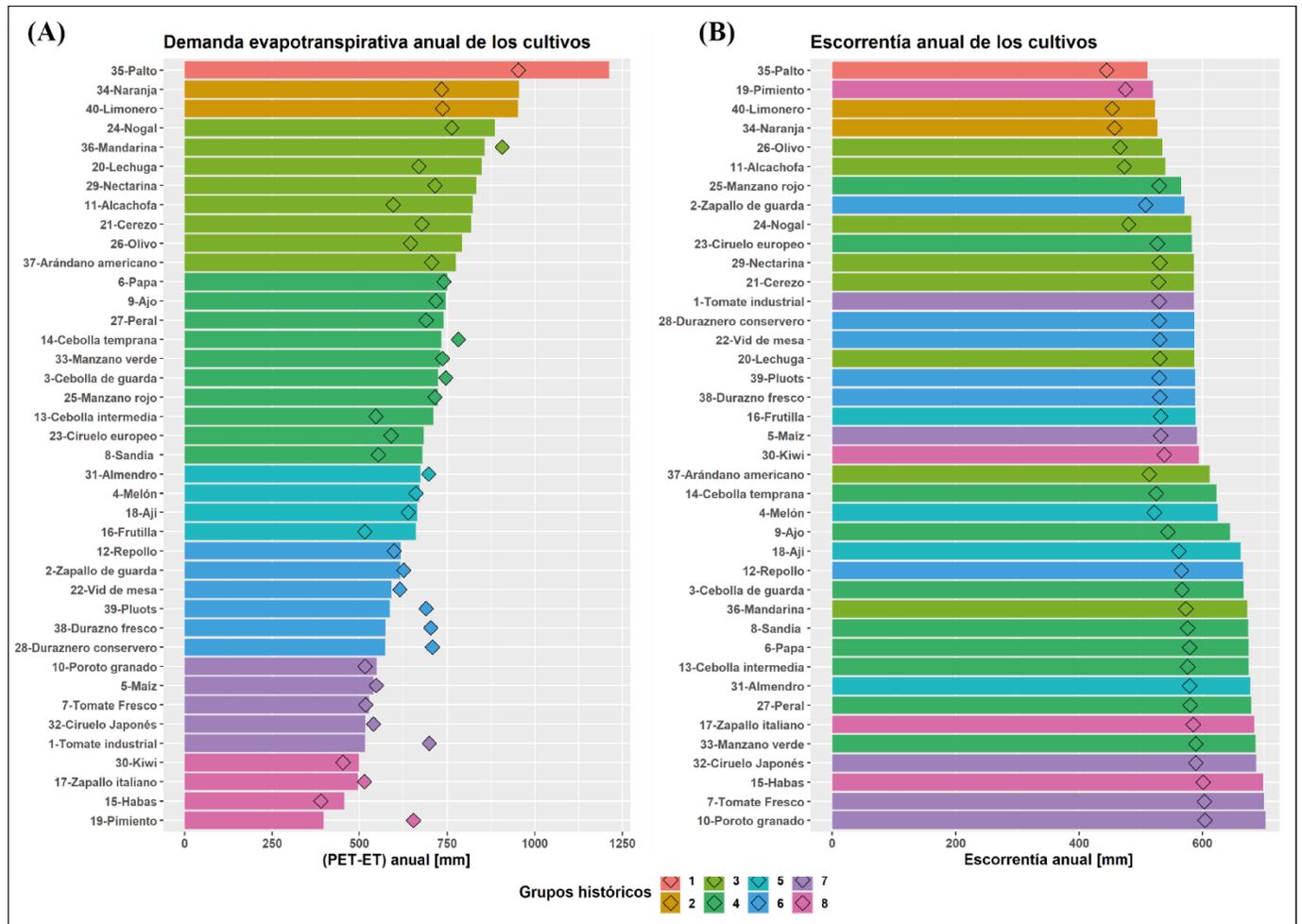


Figura 5.9: Demanda evapotranspirativa en (A) y escorrentía anual en (B) de los 40 cultivos estudiados.

En la Figura 5.9 (A) se aprecia al grupo 1 que contiene solo al Palto, el cual en el periodo futuro disminuye su demanda promedio, pero sigue siendo el más demandante del conjunto; el grupo 2 contiene a los cítricos (naranja y limonero); y el grupo 3 se compone de seis frutales y dos hortalizas (la lechuga y alcachofa, que corresponde a cultivos con alto LAI y bajo $Rmin$, en comparación al conjunto de hortalizas-anales). Luego en los grupos menos demandantes, se destaca el grupo 6 que contienen frutales como vid de mesa, el durazno fresco y conservero. Luego el grupo 7, comprende al kiwi y ciruelo, tomate industrial, tomate fresco, maíz, y poroto granado.

Luego en cuanto a la comparación entre periodo histórico y futuro, se observa que en los frutales la mayoría disminuye su demanda evapotranspirativa, a excepción del nogal, almendro, pluots, durazno fresco y conservero, que aumentan su demanda evapotranspirativa. Y en las hortalizas, el pimiento,

tomate y cebolla temprana aumenta en cierta medida su demanda evapotranspirativa, mientras que el resto se mantiene o disminuye.

Luego en la Figura 5.9 (B) se aprecia que la escorrentía varía en un rango menor de 500 mm a 700 mm, y que los grupos 1 y 2, junto con el pimiento, presentan menor escorrentía. Luego, al ir aumentando la demanda no se observa una tendencia clara donde los cultivos más demandantes sean los de menor escorrentía. Sin embargo, en los valores de mayor escorrentía se identifican principalmente cultivos del grupo 7 y 8, los cultivos menos demandantes. Además, en la comparación entre el periodo histórico y futuro, se identifica que todos los cultivos reducen la escorrentía en el periodo futuro, manteniendo la relación que poseen entre sí en el periodo histórico, salvo excepciones.

Para comprender mejor la relación entre las variables de la respuesta hidrológica, en la Figura 5.10, siguiendo el mismo formato de la Figura 5.9, se presenta en (A) el índice de aridez (P/PET), y en (B) la razón entre demanda evapotranspirativa y escorrentía anual (DE/E), donde en ambos casos corresponde a los valores promedios entre celdas factibles de cultivar y el promedio anual de cada periodo.

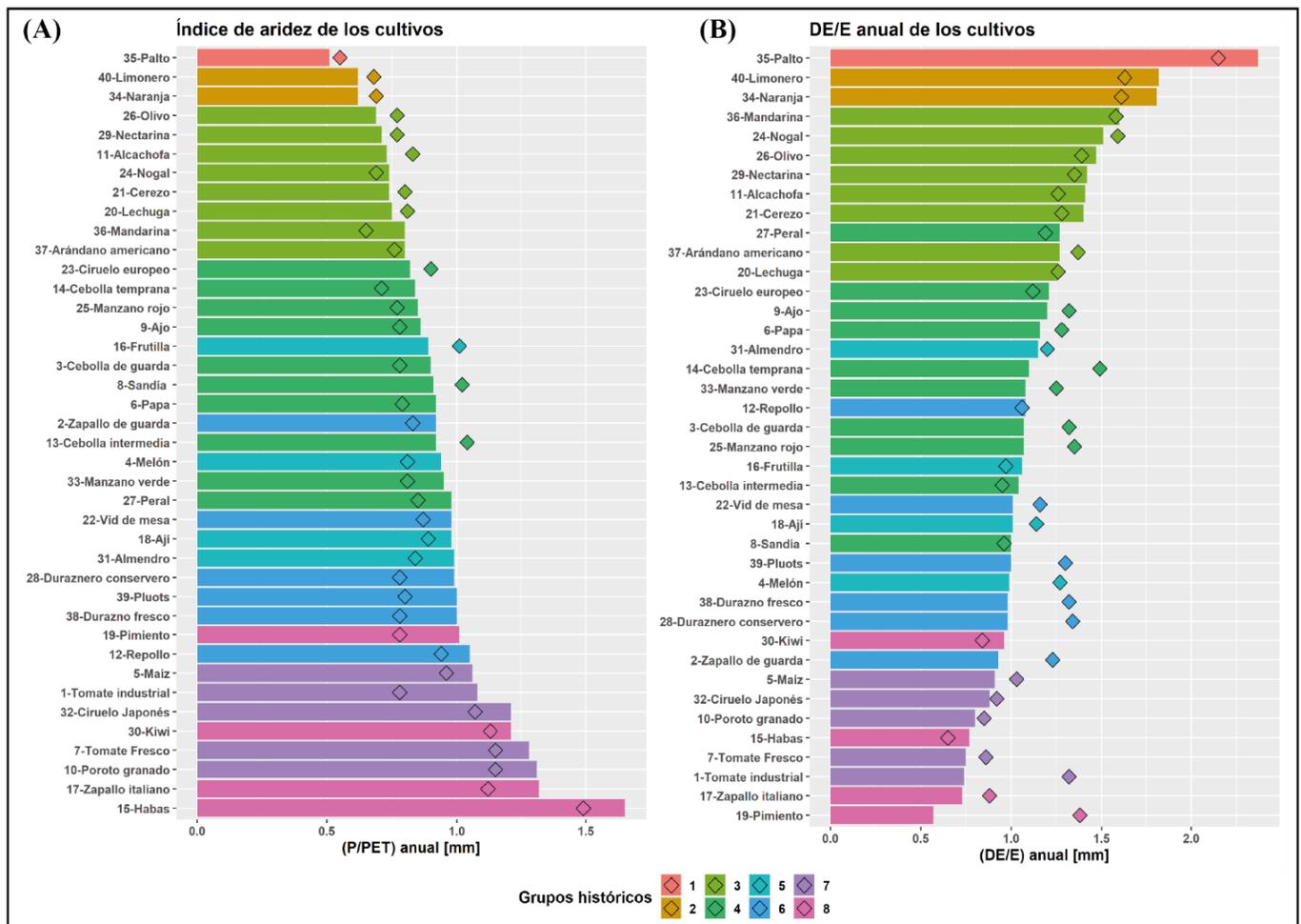


Figura 5.10: En (A) el índice de aridez (P/PET) y en (B) la fracción de la demanda evapotranspirativa sobre la escorrentía (DE/E), para los 40 cultivos estudiados.

En la Figura 5.10 (A) se observa que el índice de aridez (P/PET) aumenta a medida que aumenta la demanda evapotranspirativa, debido a que la PET junto a la ET definen la demanda, salvo algunos cultivos que no siguen el sentido de la DE , los cuales pertenecen a los grupos 5, 6, 7 y 8. Lo mismo ocurre en (B), donde el la razón DE/E está ligada a la DE salvo cultivos presentes en los grupos mencionados.

Además, en Figura 5.10 (B) se aprecia que los cultivos del grupo 1, 2 y 3 mantienen su relación DE/E en el periodo histórico como futuro, luego los cultivos de los grupos más demandantes aumentan su relación DE/E en el futuro. Esto se puede explicar porque en el caso de cultivos de menor E y mayor DE , como los cultivos del grupo 1,2 y 3, no se ve afectada su relación DE/E ya que disminuye tanto su demanda como la escorrentía, por lo que la relación se mantiene. En cambio, en los demás grupos, algunos presentan aumento de demanda en el futuro y esto unido a la reducción de escorrentía esperada por reducción de precipitaciones, se tiene una relación DE/E mayor.

Haciendo el mismo análisis para Figura 5.10 (A), se observa que los cultivos del grupo 4, 5, 6, 7, y 8 presentan mayor índice de aridez en el periodo histórico y disminuye en el periodo futuro, sin embargo, se mantienen mayores a los del grupo 1, 2 y 3. Por su parte, los cultivos del grupo 1 y 2, al disminuir su demanda en el periodo futuro hacen que su índice de aridez sea mayor, presentando una respuesta adaptativa, sin embargo, sus índices siguen siendo menores a los grupos de menor demanda. Por lo cual, a pesar de que algunos cultivos cambian en cierta medida su demanda evapotranspirativa o la escorrentía, lo relevante es el grupo al que pertenecen, debido a que esto entrega un panorama general de las relaciones jerárquicas que poseen los cultivos.

5.3 VARIACIÓN DE LA DEMANDA SEGÚN ZONA GEOGRÁFICA

A partir de la simulación de todas las celdas factibles de cultivar con un mismo tipo de cultivo, se realiza una comparación entre la demanda evapotranspirativa futura con respecto a la histórica, de modo de identificar por celda cuánto aumenta o disminuye, en porcentaje. En la Figura 5.11 se presenta la comparación entre la demanda evapotranspirativa anual en el periodo histórico (1985-2014) y el periodo futuro (2015-2059), para el tomate industrial en (A), para el durazno conservero en (B), para la papa en (C) y para el palto en (D), donde en rojo se identifican los porcentajes de aumento y en azul los de reducción. Mientras que, en Anexo B se presentan los gráficos de los cultivos restantes.

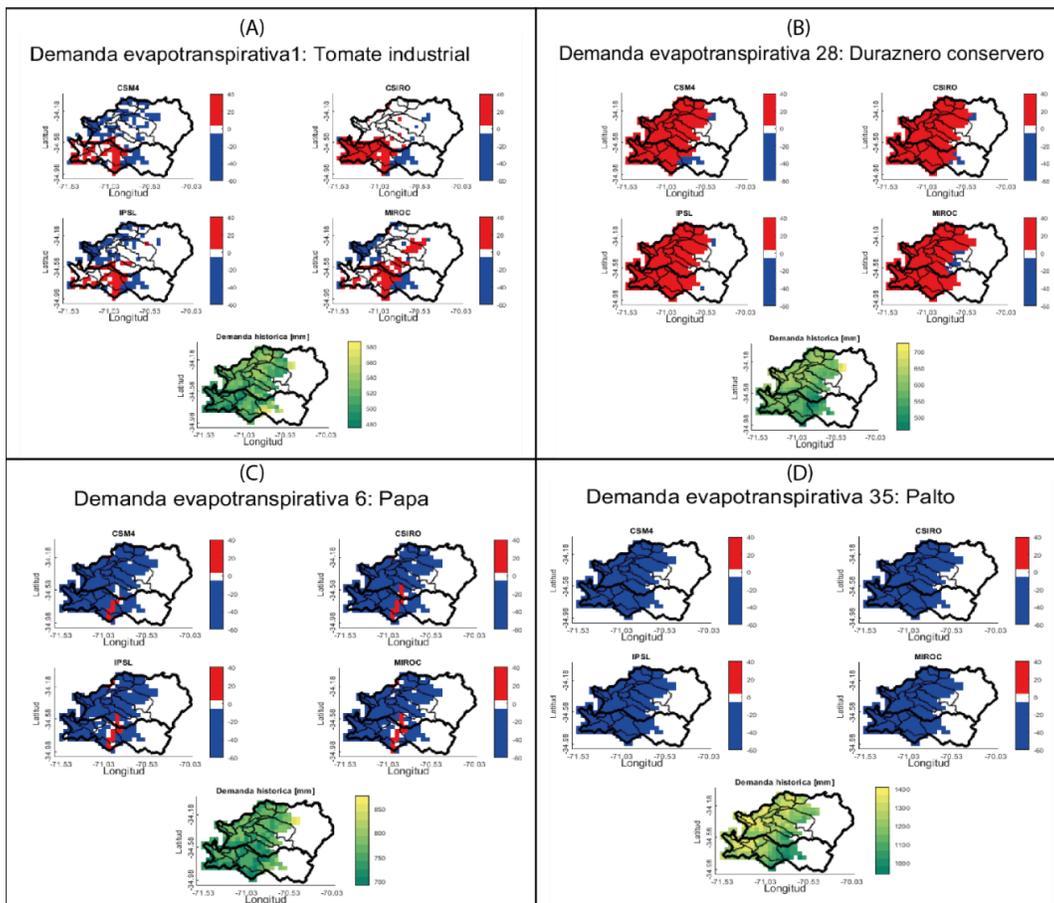


Figura 5.11: Demanda evapotranspirativa anual por celda en periodo histórico (paleta de color amarillo-verde) y el cambio en el periodo futuro con respecto al valor histórico, para los cuatros GCMs (en rojo los aumentos y en azul las reducciones).

En la Figura 5.9 se observa que el tomate no varía su demanda evapotranspirativa en gran medida entre el periodo histórico y futuro, debido a que el gráfico mostrado corresponde al promedio anual entre celdas; en cambio, en la Figura 5.11 (A), se aprecia que el tomate industrial tiene zonas donde aumenta su demanda y zonas donde disminuye.

En la Figura 5.9 (A) se nota que el durazno conservero aumenta su demanda evapotranspirativa desde 570 a cerca de 700 mm y en la Figura 5.11 (B) se percibe un aumento en todas las celdas factibles de cultivar.

En la Figura 5.9 (A) se nota que la papa disminuye su demanda evapotranspirativa levemente de 750 mm a 730 mm, y en la Figura 5.11 (C) confirma que este cambio ocurre en la mayoría de las celdas, excepto en un número menor de celdas al interior del valle de Tinguiririca donde aumenta.

En la Figura 5.9 (A) se nota que el palto disminuye su demanda evapotranspirativa desde 1200 a cerca de 950 mm ,lo cual a partir de la Figura 5.11 (D) confirma que este cambio ocurre en la todas de las celdas.

5.3.1 Cambio zonas óptimas por cultivos

Las ubicaciones óptimas se identificaron como las celdas en las cuales la demanda evapotranspirativa es menor al promedio total entre celdas factibles de cultivar. Con el fin de identificar las celdas óptimas en el periodo histórico y compararlas con el periodo futuro, se identifican las celdas óptimas históricas para cada cultivo, y para los cuatro GCMs se identifica si las celdas siguen siendo óptimas en el futuro, cambian a ser no óptimas, o bien, se vuelven óptimas. En la Figura 5.12 se presenta la comparación para el maíz en (A), el durazno conservero en (B), el ciruelo europeo en (C) y palto en (D), respectivamente.

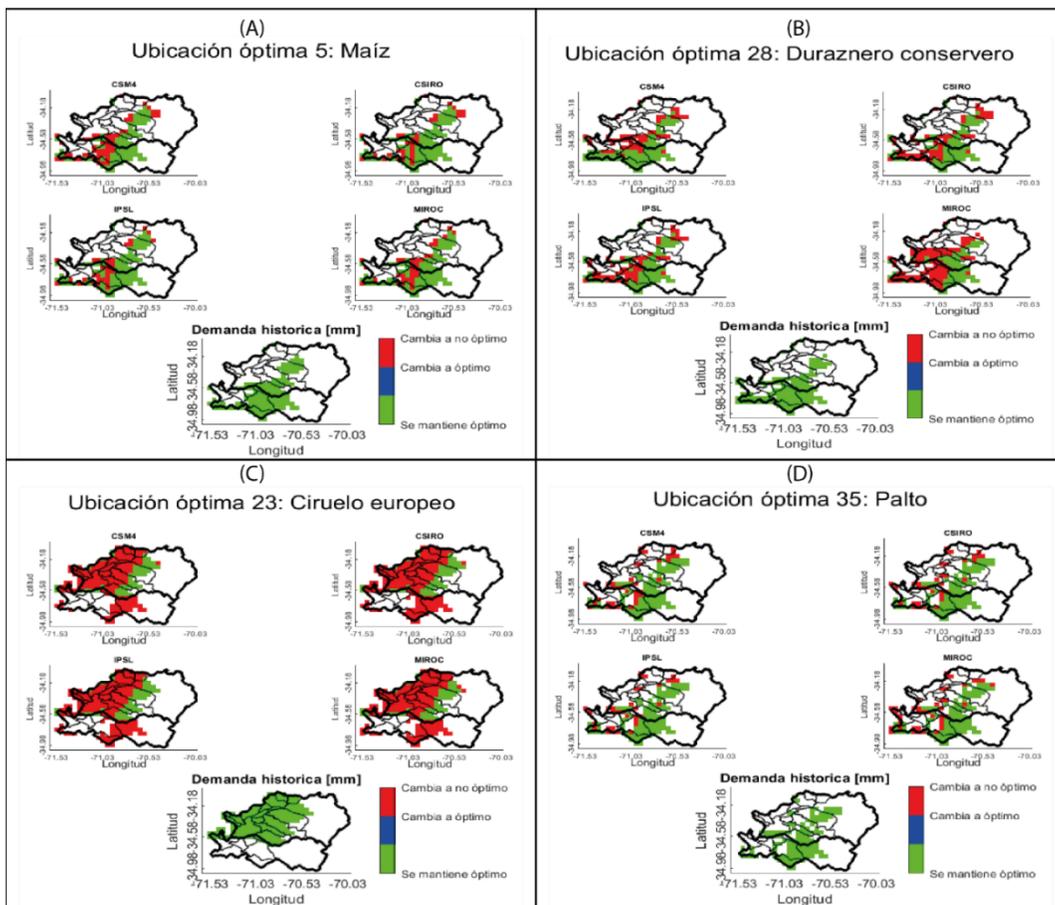


Figura 5.12: Ubicación óptima para el periodo histórico como para los cuatro GCMs del periodo futuro. En verde se indican las celdas óptimas, en rojo las celdas que dejan de ser óptimas en el futuro y en azul, las que se vuelven óptimas en el futuro.

En Anexo C se presentan las figuras para todas las clases de cultivos.

En la Figura 5.12, en (A) se observa que el maíz mantiene como óptimo parte de las comunas de Requínoa, Rengo, Malloa y San Fernando, al igual que en (B) con el durazno conservero. Luego, en (C) se aprecia que el ciruelo europeo se mantiene como zona óptima el sector este de Rengo y Requínoa, mientras que el valle del Cachapoal pasa a ser no óptimo. Y en (D) se percibe que el pato por lo general tiene sus zonas óptimas en las comunas de San Fernando, Rengo y Requínoa, y zona este de la comuna de Chimbarongo. Ver referencias de comunas en la Figura 3.2.

5.4 ANÁLISIS EVAPOTRANSPIRACIÓN NATURAL Y EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

Debido a que se desea conocer el comportamiento de evapotranspiración en las hortalizas, ya que comprenden la condición especial que presentan meses sin cultivos, se selecciona el tomate industrial y se simula una celda cultivada en un 100% por este cultivo. Con ello, se analizan los años 1997 y 1998, como representativo de año húmedo y seco, respectivamente. En base a esto, en la Figura 5.13, se presentan los montos diarios para los años 1997 y 1998, donde en (A) y (B) en el eje de la izquierda se presentan los montos diarios de la E , P , ET y PET , mientras que en el eje de la derecha se presenta la relación ET/PET ; en (C) y (D) se presentan las componentes de la ET (evaporación de la cubierta, evaporación del suelo desnudo y transpiración) junto con la PET ; y en (E) y (F) se presenta la relación entre las componentes de la ET y la PET .

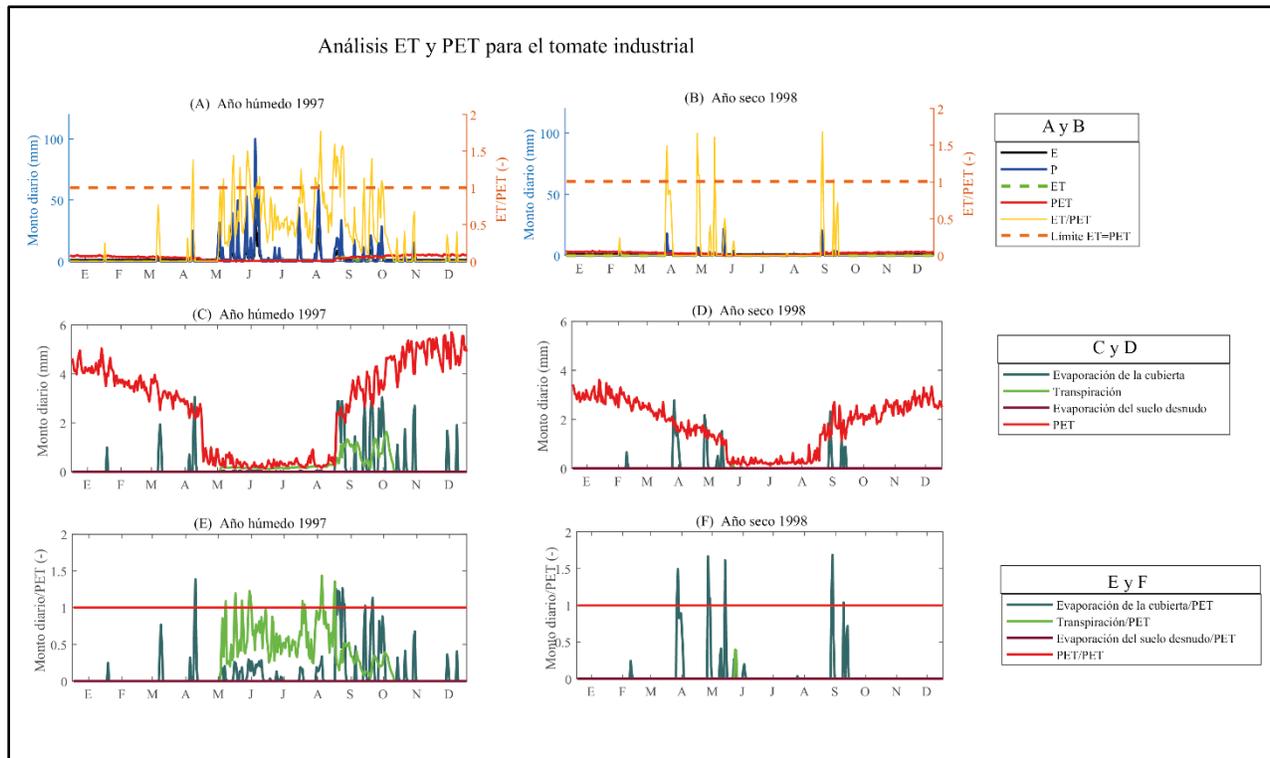


Figura 5.13: Análisis de la relación ET y PET en el modelo VIC.

El tomate industrial inicia su siembra en agosto, lo que corresponde a un almácigo ya desarrollado, y la cosecha culmina en mayo, por lo que entre mayo a agosto se introduce en el modelo un LAI cercano a nulo (ver Figura 5.1). Teniendo esto en consideración, en la Figura 5.13, a partir de la comparación de (A) y (B), es posible apreciar que los aumentos de magnitud de la relación ET/PET ocurren cuando se presentan eventos de precipitación, llegando incluso la ET a superar la PET . Luego en el año húmedo se

observa un incremento de la relación ET/PET , asociado en efecto a mayor número de eventos de lluvia. En (C) se aprecia, entre abril a octubre, que la evaporación de la cubierta es cercana a cero, y la transpiración es cercana a la PET , mientras que en (D) no se observan valores significativos de la transpiración o evaporación de cubierta, en dichos meses. Para mejor comprensión, comparando (E) y (F), se observa en el año húmedo, entre mayo y agosto, que la transpiración supera a la PET en ciertos eventos. Además, analizando la evaporación del suelo desnudo en (C) y (D), se aprecia que siempre es nula.

En base a lo anterior, se identifican señala lo siguiente:

- La evaporación del suelo desnudo en caso de tener cultivos no permanentes, no se simula de manera correcta en VIC. Debido a que solo considera la fracción total cultivada por celda, en donde en este caso se ingresa que el 100% de la celda está cultivado con tomate industrial, por lo que el valor es nulo en cualquier mes. Sin embargo, a partir del parámetro LAI se impone que en dichos meses no hay cultivo, por lo que el suelo estaría desnudo, lo que debiera generar evaporación del suelo desnudo, sin embargo, eso no ocurre.
- La transpiración, evaporación de la cubierta y la PET , al introducir LAI cercano a cero, se logra minimizar de modo de representar de mejor manera al cultivo no permanente. En (C) y (D) se aprecia como disminuye su magnitud en dichos meses. Cabe señalar, que haciendo el mismo ejercicio con LAI nulo, la transpiración y evaporación del suelo desnudo no se ven reducidas en dichos meses. Por ello, luego de una serie de simulaciones, se optó por un LAI mínimo de 0,03 para las hortalizas y de 0,05 en frutales caducos, de modo de que se logre tener una estimación de la demanda evapotraspirativa más adecuada.
- A pesar de que se logra reducir transpiración y evaporación de la cubierta en los meses en que no se cultiva, se observa que la transpiración supera a la PET en el año húmedo. Por lo que, la transpiración de los cultivos no permanentes no se simula de manera adecuada en el modelo VIC.

Para comprender lo que sucede con la transpiración, es útil mencionar que tanto ET como PET se estiman a partir de las mismas ecuaciones, pero la ET se simula en VIC con resistencia nula ($r_0[n]$ presente en las ecuaciones y denominado $Rarc$ en este trabajo), mientras que la PET se modela con la resistencia propia del cultivo y sin estrés hídrico ($g_{sm}[n] = 1$, en la Ecuación 2.13).

En base a lo anterior, para la ET en eventos de lluvia, debido al incremento de humedad del suelo, no habría estrés hídrico, lo que involucra que la resistencia del follaje $r_c[n]$ en la ecuación 2.13 es cercana a cero, luego en la ecuación 2.12 de la transpiración se tiene $r_0[n] = r_c[n] = 0$, lo que hace que la fracción $\frac{r_w[n]}{r_w[n]+r_0[n]+r_c[n]}$ sea cercana a 1, y con ello ET se incrementa.

Por su parte, PET no tienen estrés hídrico en ningún caso (es decir, $r_c[n] > 0$) y presenta un $r_0[n] > 0$ ($Rarc$ no nulo), por ello la fracción $\frac{r_w[n]}{r_w[n]+r_0[n]+r_c[n]}$ es menor a 1, lo que a su vez, genera un menor valor de la ET . Por este motivo, en el modelo VIC la ET supera a la PET en eventos de lluvia.

Aquí, es útil analizar el efecto del LAI en la ecuación 2.13, donde aparece como denominador. En ella se aprecia que al tener un LAI de mayor magnitud, se genera la reducción de $r_c[n]$, por lo que la fracción $\frac{r_w[n]}{r_w[n]+r_0[n]+r_c[n]}$ se hace mayor y la ET se incrementa. En caso contrario, si LAI es cercano a 0, en este caso $r_c[n]$ es infinito, por lo que la fracción es tendiente a cero, con ello ET debiese ser nula.

Por ende, en eventos de precipitación (como se analiza en la Figura 5.13), a pesar de la condición de *LAI* cercano a cero, la transpiración supera a la *PET*, debido a que el factor de estrés hídrico ($g_{sm}[n]$) es más preponderante que el parámetro *LAI* en la ecuación 2.13.

Para analizar la influencia del factor de estrés hídrico en la transpiración, es útil el estudio de Rakovec et al. (2019), en el cual se señala la dificultad del modelo VIC para simular la evapotranspiración. En dicho estudio se comparan dos modelos, el modelo VIC y el mHM, los cuales son calibrados y posteriormente se analizan los resultados de la *ET* simulada versus la *ET* medida (materializada en un producto llamado FLUXNET de la NASA). En esto, para el modelo VIC, se reporta un comportamiento donde la razón *ET/PET* es mayor a 1, en particular el componente de transpiración es el que tiene mayor importancia, lo cual indican que está asociada a la humedad del suelo. Además, se señala que los parámetros calibrados asociados a la humedad del suelo y presentes en la modelación de la transpiración están relacionados con dicho comportamiento, dichos parámetros son el punto de marchitez y el punto crítico (presentes en la Ecuación 2.16). Finalmente, se señala que, si estos parámetros no son los adecuados, y a la vez se tiene una diferencia pequeña entre el punto de marchitez y el punto crítico, cuando el punto crítico tiene un valor bajo, se produce un factor de estrés cercano a 1, lo que reduce el valor de la resistencia ($r_c [n]$) de la ecuación 2.16, y con ello se incrementa la transpiración. Esto explica por qué la transpiración es influenciada más por el factor de estrés hídrico, que por el *LAI* impuesto.

En base a que los parámetros de suelo del modelo fueron obtenidos del proceso de calibración de DGA (2018), una manera adecuada de menguar este comportamiento erróneo de la *ET* es introducir un *LAI* cercano a cero, debido a que con *LAI* igual a cero se genera el comportamiento de un cultivo permanente, donde en dichos eventos la *ET* supera en mayor medida a la *PET*. Además, debido que aún con la condición de *LAI* cercano a cero se presenta transpiración y evaporación de la cubierta, la demanda evapotranspirativa en dichos meses se impone como nula. Por su parte, el problema de la evaporación del suelo no logró ser solucionado en este trabajo.

5.5 RESULTADOS ESCENARIOS FUTUROS

5.5.1 Criterio para definición de los escenarios

Criterio 1: Fracciones óptimas

En base a la distribución de cultivos según el CBC, se plantean modificaciones a dicha distribución, considerando que deben plantarse cultivo menos demandante y en menor medida los más demandantes, buscando una distribución lineal entre los cultivos, lo cual se denomina distribución óptima. Finalmente, las otras distribuciones empleadas en los escenarios futuros son: la distribución solo en los grupos 1 y 2 y en los grupos 1, 2 y 3, denominada g12 y g123, respectivamente. Con ello, en la Tabla 5.5 se presenta el porcentaje por grupo de cada distribución de cultivos empleada en la definición de los escenarios futuros, por subcuena.

Tabla 5.5: Distribución de cultivos aplicado en los escenarios planteados.

Porcentaje de cada grupo de cultivos por escenario.									
Subcuenca Cachapoal					Subcuenca Tinguiririca				
Grupo	CBC	Óptima	g12	g123	Grupo	CBC	Óptima	g12	g123
1	2,6%	2,6%	50%	33%	1	0,20%	0,2%	50%	33%
2	3,6%	3,6%	50%	33%	2	1,4%	1,4%	50%	33%
3	9,2%	6,7%	0%	33%	3	6,4%	6,4%	0%	33%
4	11,8%	9,3%	0%	0%	4	11,0%	8,0%	0%	0%
5	7,7%	12,7%	0%	0%	5	10,0%	13,0%	0%	0%
6	30,4%	30,4%	0%	0%	6	21,5%	21,5%	0%	0%
7 y 8	34,6%	34,6%	0%	0%	7 y 8	49,5%	49,5%	0%	0%

En la Tabla 5.5 se aprecia que la distribución CBC de cada subcuenca presenta mayor porcentaje de grupos menos demandantes, donde en la subcuenca de Cachapoal se presenta mayores porcentajes en los grupos 3, 4, 6, 7 y 8, y en Tinguiririca se tiene mayores porcentajes en los grupos 4,5, 6, 7 y 8. A su vez los grupos 1 y 2 son los menos cultivados en ambas subcuencas. Además, en el caso de Cachapoal se tiene un porcentaje mayor del grupo 3 (9,2%), mientras que en Tinguiririca dicho grupo presenta un porcentaje de 6,4%.

Por ello, se estima que la distribución de la cuenca del Rapel presenta en general una distribución centrada en cultivos de menor demanda evapotranspirativa, por este motivo la distribución óptima aplica leves ajustes a la distribución del CBC. Además, se aprecia que Tinguiririca posee una distribución inicial de cultivos de menor demanda evapotranspirativa que Cachapoal.

Criterio 2: Zonas óptimas

En Anexo C se presentan la ubicación óptima para cada clase de cultivo, tanto para las forzantes históricas y futuras (CSM4, CSIRO, IPSL y MIROC). Luego, en la Figura 5.14 y la Figura 5.15, se presenta la ubicación óptima futura utilizada en los escenarios, para las hortalizas-anauales y frutales-viñedos, respectivamente. Esta zona óptima futura, considera las celdas óptimas comunes de los cuatro GCMs.

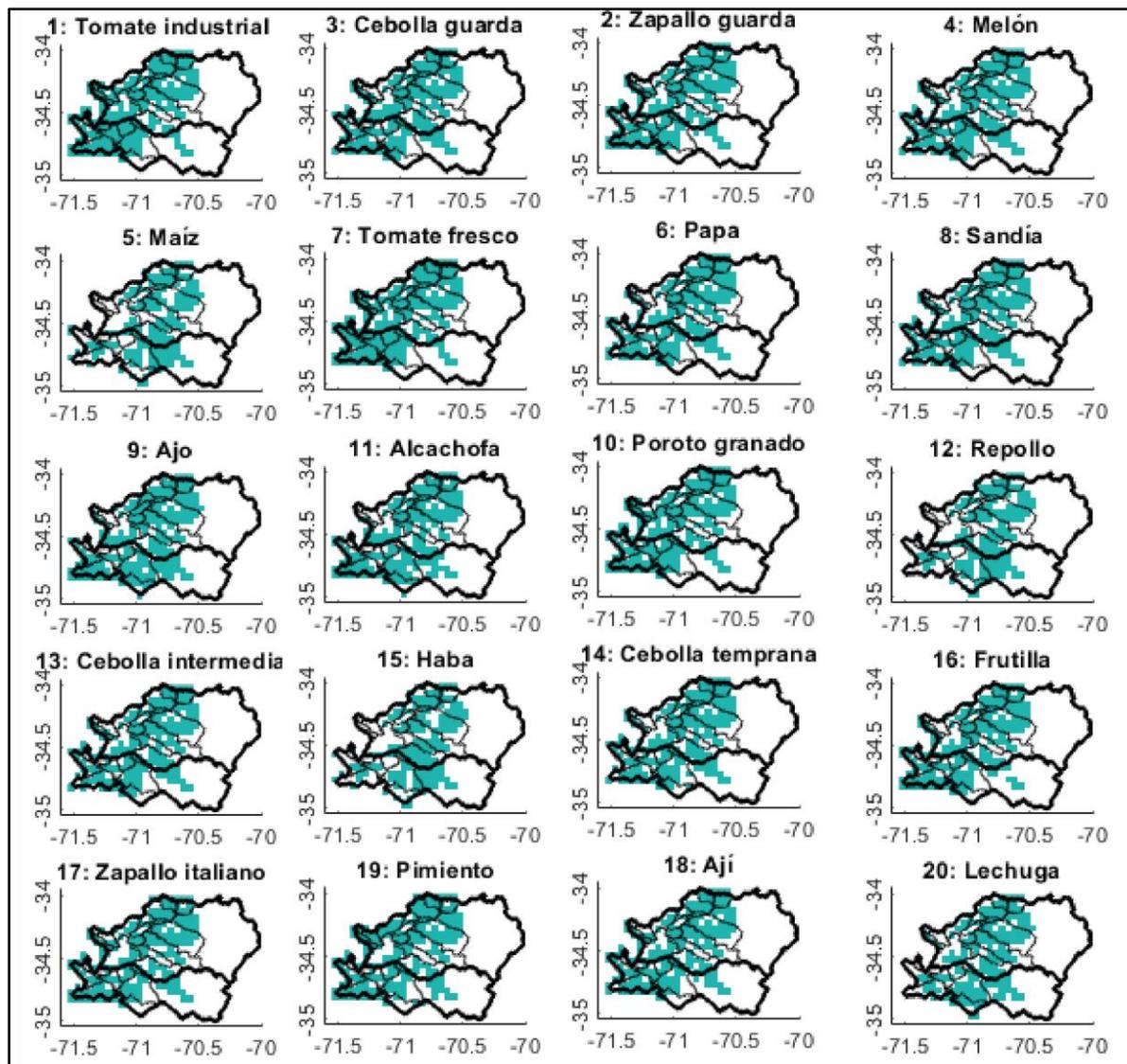


Figura 5.14: Ubicación óptima hortalizas y anuales - Periodo futuro (2015-2059), zona común de los cuatro GCMs.

En Figura 5.14 se aprecia que los cultivos hortícolas-anauales presentan aproximadamente la misma zona factible de cultivar, excepción del Maíz, el repollo y haba, que no presentan celdas óptimas en las comunas del sector del valle de Cachapoal, cercano al punto de cierre de la subcuenca, en donde se encuentran las comunas de Las Cabras, Peumo y el San Vicente (ver ubicaciones de las comunas en la Figura 3.2).

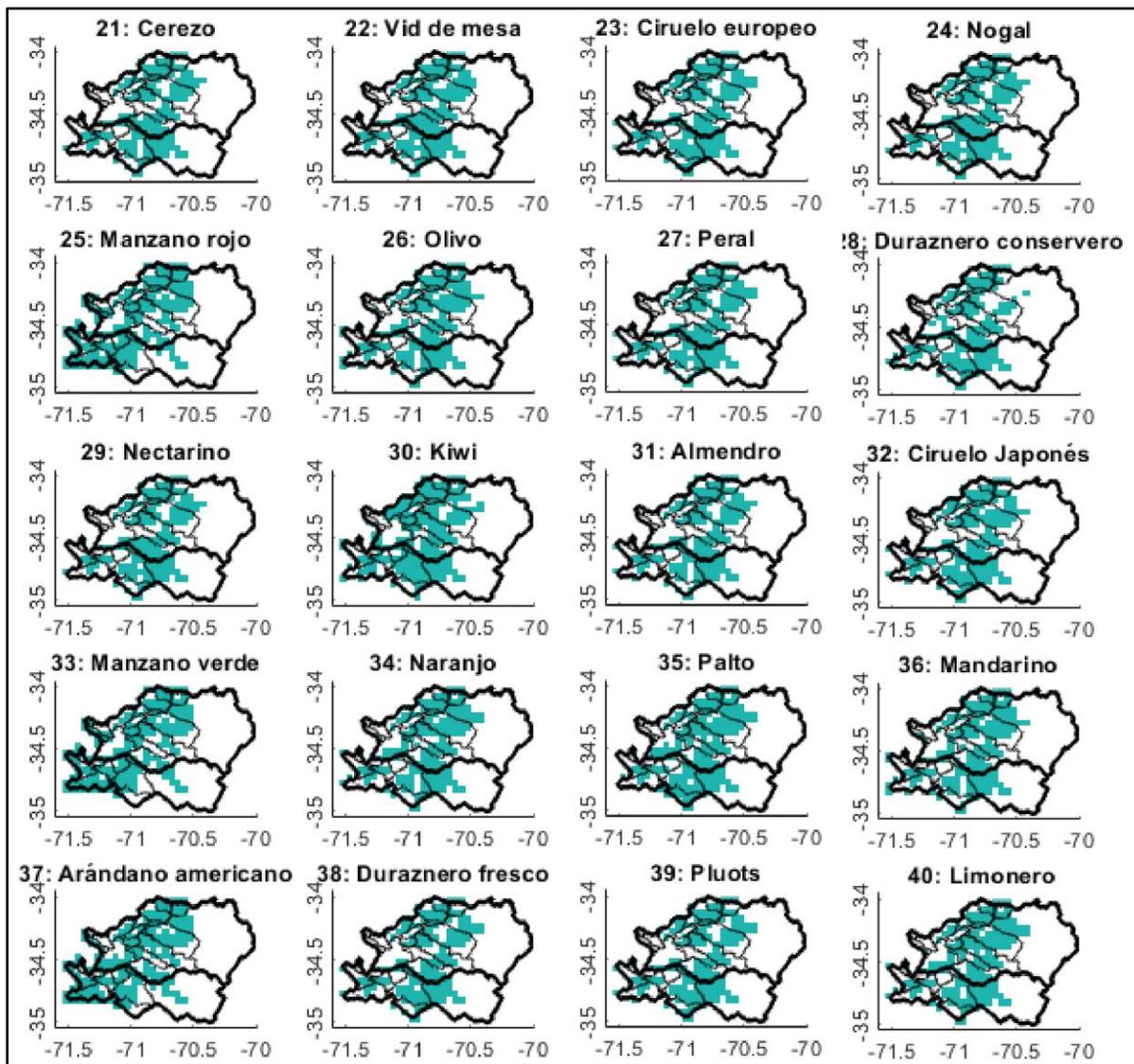


Figura 5.15: Ubicación óptima frutales y viñedos- Periodo futuro (2015-2059), zona común de los cuatro GCMs.

En la Figura 5.15 se aprecian que los frutales - viñedos presentan leves diferencias, abarcando casi la totalidad de las comunas, a excepción de las comunas de Las Cabras, Peumo y el San Vicente, en donde se aprecia que en algunos cultivos la comuna de San Vicente tiene solo algunas celdas óptimas, mientras que, Las Cabras y Peumo, no poseen zonas óptimas. Además, el valle de las comunas de Requínoa, Rengo, Malloa, San Fernando y Chimbarongo, son óptimas para casi todos los cultivos frutales-viñedos. Por último, se destaca que Santa Cruz es una zona óptima para los manzanos rojo y verde, y para el arándano americano.

Criterio 3: Áreas máximas

En la Figura 5.16 se muestra las áreas que comprenden los límites de pendiente de 7°, 11° y 17°, donde se agrega el área de cultivo de Zhao et al. (2014), lo cual define el área del escenario CBC. El área del CBC se presenta sobre las áreas de pendiente para mejor visualización.

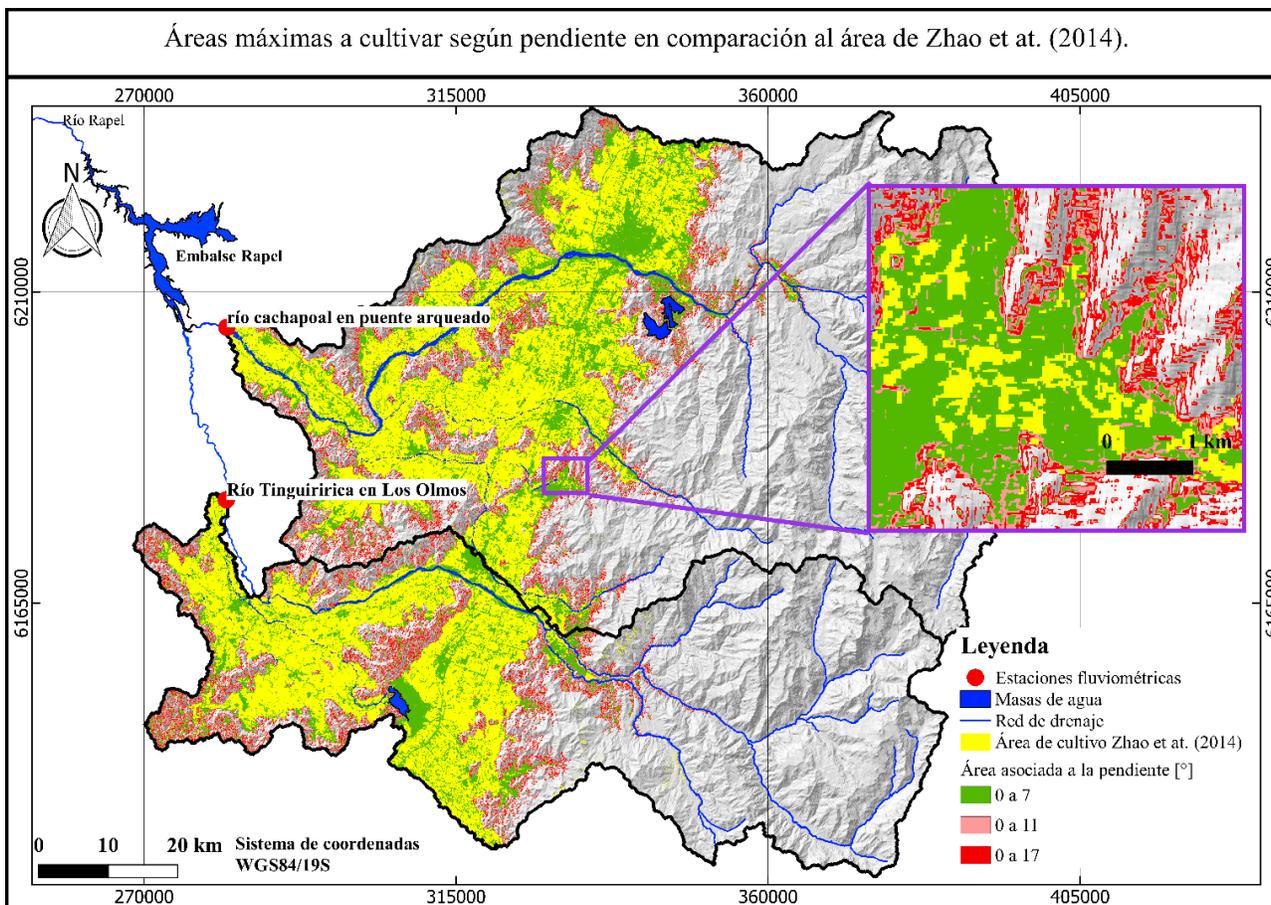


Figura 5.16: Mapa que muestra la pendiente del terreno de la zona de estudio. La pendiente es calculada en grados. Fuente: ASF DAAC 2014; Incluye material de © JAXA/METI 2007.

En la Figura 5.16 se aprecia en general que el área del CBC es menor a las áreas de pendiente, sin embargo, en ciertas zonas puede superar a la pendiente de 7°, es por ello que es necesario mostrar el porcentaje total que cubre cada pendiente para poder compararlos de mejor manera, lo cual se presenta en la Tabla 5.6.

Por otra parte, se observa que las pendientes de 17° abarcan zonas actualmente no cultivadas, comprendiendo un límite máximo de área, debido al poco acceso que tendría para el cultivo, las pérdidas asociadas en el transporte de agua y la erosión asociada.

a) **Escenarios planteados**

En la Tabla 5.6 se presentan para cada subcuenca y escenario: la distribución de cultivos empleada; la ubicación de los cultivos, que puede ser solo en zonas óptimas o en todas las celdas disponibles; si el escenario para cumplir el área máxima reemplaza otros usos como bosques, pastizales o matorrales; el porcentaje de celdas óptimas utilizadas con respecto al área máxima utilizada; el porcentaje cultivado con respecto al área total de la cuenca; y el porcentaje cultivado con respecto área cultivada del CBC.

Tabla 5.6: Características de los escenarios futuros y el CBC, para la subcuenca de Cachapoal (C) y Tinguiririca (T).

Escenario de uso de suelo	Distribución de cultivos	Ubicación de los cultivos	¿Reemplaza bosques, pastizales y matorrales?	Porcentaje celdas óptimas utilizadas		Porcentaje de área cultivada c/r área total		Porcentaje de área cultivada c/r área del CBC	
				C	T	C	T	C	T
CBC	Censo 2007	Todas las celdas	No	-	-	20,8%	28%	100%	100%
R25	Óptima	Óptima	No	100%	100%	15,6%	21%	75%	75%
R40	Óptima	Óptima	No	100%	100%	12,5%	17%	60%	60%
S7	Óptima	Óptima	No	85%	88%	21,5%	25%	103%	89%
S11	Óptima	Óptima	No	78%	83%	21,7%	26%	104%	91%
S17	Óptima	Óptima	No	70%	73%	21,9%	26%	105%	93%
S17C_cbc	Censo 2007	Todas las celdas	Sí	70%	73%	31,4%	36%	151%	126%
S17C_g12	Grupos 1,2	Todas las celdas	Sí	70%	73%	31,4%	36%	151%	126%
S17C_g123	Grupos 1, 2 y 3	Todas las celdas	Sí	70%	73%	31,4%	36%	151%	126%

En la Tabla 5.6 se aprecia según la columna de porcentaje de área cultivada con respecto al área del CBC, que en el caso de la subcuenca de Cachapoal la pendiente de 7 ° es mayor al área del CBC, mientras que para Tinguiririca el área del CBC es mayor a las áreas de pendiente, donde la pendiente de 17° comprende el 93% del área del CBC. Por ello, en el caso de Tinguiririca los escenarios S7, S11 y S17 comprenden reducción de área, mientras que para Cachapoal comprenden aumentos de área. Este cambio de sentido ocurre, porque los escenarios S7, S11 y 17 solo utiliza las celdas óptimas disponibles en el área límite dada por las pendientes respectivas. Con ello, en particular en Cachapoal el escenario S17 toma un 70% del total comprendido en el área máxima de 17° de pendiente, a diferencia del escenario S17_cbc que toma todas las celdas disponibles, lo que corresponde al 70% de celdas óptimas más un 30% de celdas no óptimas.

Luego para los escenarios S17_cbc, S17_g12 y S17_g123, se emplean todas las celdas disponibles, por lo que para ambas subcuencas comprende un aumento de área respecto al CBC. Con ello en Cachapoal dichos escenarios comprenden un porcentaje de área cultivada con respecto al CBC de 151% y para

Tinguiririca de 126%. Para estos escenarios, se reemplazan las clases de bosques, pastizales y matorrales, por cultivos, cuando es necesario de modo de cubrir el área máxima de pendiente 17 °.

Para los escenarios de reducción de R25 y R40, las celdas a seleccionar fueron aquellas perteneciente al CBC ubicadas a una pendiente menor de 7°, de modo que se cultiven los predios ubicados en zonas planas, con mayor acceso.

Por último, cabe notar que a medida que aumenta el área asociada a la pendiente, el porcentaje de celdas óptimas utilizadas decrece, debido a que se compara con un área mayor y la mayor concentración de zonas óptimas se ubica a pendiente menores.

5.5.2 Resultados de los escenarios a nivel anual

En esta sección se presentan los resultados de los escenarios futuros planteados para cada subcuenca de estudio, donde se analizan la respuesta hidrológica a nivel anual, lo cual comprende el promedio anual del periodo histórico (1985-2014) y la consideración del periodo futuro en dos tramos (del 2015-2039 y del 2040-2069), teniendo en cuenta año hidrológico de abril a marzo.

Se analizan las variables escorrentía (*E*), precipitación (*P*), evapotranspiración (*ET*) y demanda evapotranspiraría (*DE*), donde *E*, *P* y *ET* son derivadas del área total de la cuenca, mientras que la *DE* sólo es calculada en las áreas agrícolas, ya que comprende la estimación del requerimiento hídrico asociado a agricultura. Es por ello, que se trabaja en términos de volúmenes.

Para el análisis anual, se presentan los porcentajes de cambio, en su valor medio, máximo y mínimo, derivados de los resultados de los cuatro GCMs , para la subcuenca de Cachapoal en la Tabla 5.7 y para la subcuenca de Tinguiririca en la Tabla 5.8.

Tabla 5.7: Porcentaje de cambio anual en la escorrentía (*E*), precipitación (*P*), evapotranspiración (*ET*) y demanda evapotranspiraría (*DE*), en cada escenario futuro para la subcuenca de Cachapoal.

Subcuenca		Cachapoal							
Escenario		2015-2040	2040-2059	2015-2040	2040-2059	2015-2040	2040-2059	2015-2040	2040-2059
		E [%]	E [%]	P [%]	P [%]	ET [%]	ET [%]	DE [%]	DE [%]
CBC	Mínimo	-12%	-28%	-7%	-27%	-12%	-23%	2%	4%
	Promedio	-10%	-21%	-6%	-17%	-6%	-12%	2%	4%
	Máximo	-8%	-13%	-5%	-7%	1%	1%	3%	5%
R25	Mínimo	-12%	-29%	-7%	-27%	-10%	-20%	-11%	-9%
	Promedio	-11%	-22%	-6%	-17%	-3%	-9%	-11%	-9%
	Máximo	-9%	-14%	-5%	-7%	4%	3%	-10%	-9%
R40	Mínimo	-13%	-30%	-7%	-27%	-9%	-18%	-22%	-20%
	Promedio	-11%	-23%	-6%	-17%	-2%	-8%	-21%	-20%
	Máximo	-9%	-14%	-5%	-7%	5%	4%	-21%	-20%
S7	Mínimo	-11%	-28%	-7%	-27%	-13%	-23%	-3%	-1%
	Promedio	-10%	-21%	-6%	-17%	-6%	-13%	-3%	-2%
	Máximo	-8%	-13%	-5%	-7%	0%	0%	-2%	0%
S11	Mínimo	-11%	-28%	-7%	-27%	-12%	-23%	-1%	1%
	Promedio	-10%	-21%	-6%	-17%	-5%	-12%	0%	2%
	Máximo	-8%	-13%	-5%	-7%	1%	1%	0%	3%
S17	Mínimo	-11%	-28%	-7%	-27%	-12%	-23%	0%	2%
	Promedio	-10%	-21%	-6%	-17%	-5%	-12%	1%	3%
	Máximo	-8%	-13%	-5%	-7%	1%	1%	1%	4%
S17_cbc	Mínimo	-9%	-27%	-7%	-27%	-17%	-28%	8%	10%
	Promedio	-8%	-19%	-6%	-17%	-11%	-18%	9%	11%
	Máximo	-6%	-11%	-5%	-7%	-5%	-6%	9%	12%
S17_g123	Promedio	-12%	-29%	-7%	-27%	-11%	-21%	30%	32%
	Mínimo	-10%	-22%	-6%	-17%	-4%	-11%	31%	33%
	Máximo	-8%	-14%	-5%	-7%	3%	2%	31%	34%
S17_g12	Promedio	-13%	-30%	-7%	-27%	-8%	-18%	38%	40%
	Mínimo	-11%	-23%	-6%	-17%	-1%	-7%	39%	41%
	Máximo	-9%	-15%	-5%	-7%	6%	6%	39%	42%

En la Tabla 5.6 en cuanto a la *P*, se observa en el periodo (2015-2039) se espera una reducción que de 5% hasta 7% y para el periodo (2040-2059) de 7% a 27%, lo cual comprende una alta dispersión de los datos del segundo periodo, lo que refleja la incertidumbre de los GCMs.

En cuanto a la *E*, se observa en general una reducción de un 8% a 13% para el periodo (2015-2039) y de 11% a 30% para el periodo (2040-2059). Por su parte, los escenarios planteados presentan leves diferencias de escorrentía con respecto al CBC en su periodo respectivo.

En los escenarios S17, S11 y S17 no presentan diferencias entre sí y responden igual CBC en los periodos respectivo. En los escenarios R25 se presenta una reducción de 1% mayor que CBC en el periodo (2040-2059), mientras que el R40 de un 2%. En el mismo periodo, el S17_g123 comprende una reducción de 1% mayor que CBC en dicho periodo, y el S17_g12 de 2%. Por último, el S17_cbc presenta una mayor diferencia, donde en el periodo (2040-2059) se tiene una reducción promedio de 19% comparado con el 21% del CBC en dicho periodo. Luego, en base a dichos resultados, se aprecia que al tener una menor área cultivada (como los escenarios R25 y R40) y/o se seleccionan los cultivos más demandantes (como los escenarios S17_G12 y S17_g123) se tiene una reducción de la *E* mayor, pero esto solo significa un cambio de 1% o 2% entre escenarios. En esto se analiza que al aumentar el suelo desnudo también provocaría una reducción de la *E* al igual que tener una matriz de cultivos demandantes.

En cuanto a la *ET*, en todos los casos se presenta reducción lo cual está asociado a la reducción de la humedad, por disminución de precipitaciones en los periodos futuros. En los escenarios S17, S11 y S17 no presentan diferencias entre sí y responden igual CBC en los periodos respectivo. En R25 y R40 se observa que, a menor área, se tiene una menor reducción de la *ET*, obteniendo reducción de 9% en R25 y 8% en R40 para el segundo periodo, en comparación a los 12% del CBC. En S17_g123 y S17_g12 se observa también un aumento de la *ET*, con respecto al CBC, que hace que la reducción esperada sea menor, mientras que el S17_cbc genera una reducción mayor en el segundo periodo. Luego, en función de los escenarios planteados, se aprecia que al plantar menor áreas y/o si se plantan cultivos más demandantes, se obtiene un aumento de *ET*, con lo que la reducción esperada se hace menor.

En cuanto a la *DE*, para el caso CBC se proyecta un aumento de 2% en el periodo (2015-2039) y de 4% en el periodo (2040-2059). En los escenarios de pendiente, S7 comprende una reducción de 3% en el periodo (2015-2039) y de 2% en el periodo (2040-2059). S11 comprende aumento de 2% en el segundo periodo y S17 de 3%. Si se comparan sus áreas, S7, S11 y S17 son de aumento de área, donde S7 es solo 3% mayor en área que el CBC, pero al tener solo celdas óptimas, puede reducir la demanda. En R25 y R40 se observa reducciones importantes de 11% en R25 y 21% en R40 para el periodo (2015-2039), y de 9% en R25 y 20% en R40 para el periodo (2015-2039). Los escenarios, S17_cbc, S17_g123 y S17_g12 presentan aumento de demanda, en donde para el periodo (2040-2059) se espera un aumento de 11% para el S17_cbc, de 33% para el S17_g123 y de 41% para el S17_g12.

Analizando lo anterior, en todos los escenarios se aprecia un aumento en el periodo (2040-2059) con respecto al periodo (2015-2039), donde el aumento en el segundo periodo es explicado por el aumento de temperatura y reducción de *P* en el futuro.

Por ello, para Cachapoal los únicos escenarios de reducción de la *DE*, comprenden S7, R25 y R40, lo cual R25 y R40 está ligado a la reducción de área y S7 a la utilización de celdas óptimas.

Tabla 5.8: Porcentaje de cambio anual en la escorrentía (*E*), precipitación (*P*), evapotranspiración (*ET*) y demanda evapotranspiraría (*DE*), para cada escenario futuro de la subcuenca de Tinguiririca.

Subcuenca		Tinguiririca							
Escenario		2015-2040	2040-2059	2015-2040	2040-2059	2015-2040	2040-2059	2015-2040	2040-2059
		E [%]	E [%]	P [%]	P [%]	ET [%]	ET [%]	DE [%]	DE [%]
CBC	Mínimo	-12%	-29%	-8%	-27%	-10%	-22%	2%	3%
	Promedio	-10%	-21%	-7%	-17%	-5%	-12%	3%	5%
	Máximo	-9%	-13%	-6%	-7%	1%	3%	3%	6%
R25	Mínimo	-13%	-30%	-8%	-27%	-8%	-19%	-10%	-7%
	Promedio	-11%	-22%	-7%	-17%	-2%	-9%	-8%	-7%
	Máximo	-10%	-14%	-6%	-7%	4%	5%	-7%	-6%
R40	Mínimo	-13%	-30%	-8%	-27%	-7%	-18%	-19%	-17%
	Promedio	-11%	-22%	-7%	-17%	-1%	-8%	-18%	-17%
	Máximo	-10%	-14%	-6%	-7%	5%	6%	-17%	-16%
S7	Mínimo	-12%	-28%	-8%	-27%	-10%	-22%	-14%	-12%
	Promedio	-10%	-21%	-7%	-17%	-5%	-12%	-13%	-13%
	Máximo	-9%	-13%	-6%	-7%	1%	2%	-13%	11%
S11	Mínimo	-12%	-28%	-8%	-27%	-10%	-23%	-12%	-11%
	Promedio	-10%	-21%	-7%	-17%	-5%	-12%	-11%	-10%
	Máximo	-9%	-13%	-6%	-7%	0%	2%	-11%	-8%
S17	Mínimo	-12%	-28%	-8%	-27%	-10%	-23%	-11%	-10%
	Promedio	-10%	-21%	-7%	-17%	-5%	-12%	-10%	-8%
	Máximo	-9%	-13%	-6%	-7%	1%	2%	-10%	-7%
S17_cbc	Mínimo	-11%	-27%	-8%	-27%	-13%	-26%	-12%	-11%
	Promedio	-9%	-20%	-7%	-17%	-9%	-16%	-12%	-9%
	Máximo	-8%	-12%	-6%	-7%	-3%	-2%	-11%	-8%
S17_g12	Mínimo	-15%	-31%	-8%	-27%	-4%	-16%	18%	20%
	Promedio	-13%	-23%	-7%	-17%	3%	-5%	19%	22%
	Máximo	-11%	-16%	-6%	-7%	9%	10%	20%	23%
S17_g123	Mínimo	-13%	-30%	-8%	-27%	-7%	-19%	11%	12%
	Promedio	-12%	-22%	-7%	-17%	-1%	-8%	12%	14%
	Máximo	-10%	-15%	-6%	-7%	5%	7%	12%	15%

En la Tabla 5.8 en cuanto a la *P*, se proyecta una reducción de 6% a 7% en el periodo (2015-2039) y de 7% a 27% para el periodo (2040-2059), similar a Cachapoal. De la misma forma, presenta alta dispersión del resultado, asociada a los GCMs, donde dicha variación es mayor para el segundo periodo.

En cuanto a la *E*, en general se espera una reducción de 8% a 15% para el periodo (2015-2039) y de 13% a 31% para el periodo (2040-2059).

Continuando con la *E*, en los escenarios planteados se presentan leves diferencias con respecto al CBC en su periodo respectivo. En los escenarios S17, S11 y S17 no presentan diferencias entre sí y son similares al CBC en el primer periodo futuro, luego en el segundo se tienen valores promedios iguales al CBC, a excepción de los valores mínimos, que corresponden una diferencia de 1% con respecto al CBC. En los escenarios R25 y R40 se presenta una diferencia de 1% con respecto al CBC en ambos periodos. Luego en el periodo (2040-2059), el S17_g123 comprende una diferencia de 1% con respecto al CBC en dicho periodo, y el S17_g12 de 2%. Mientras que el S17_cbc presenta un aumento, donde en el periodo (2040-2059) se tiene un cambio de -12% a -27%, comparado con el rango de -13% a -29% del CBC en dicho periodo. Luego, al igual que en Cachapoal, se aprecia que al tener una menor área cultivada y/o se seleccionan los cultivos más demandantes, se tiene una reducción de la *E* mayor, pero esto solo significa un cambio de 1% o 2% entre escenarios.

En cuanto a la *ET*, en todos los casos se presenta reducción, lo cual se asocia a la reducción de la *P* proyectada. Por su parte, S17 es similar al CBC en cada periodo. Pero S11 y S17 comprenden una reducción mayor que el CBC en el segundo periodo, llegando hasta una reducción de 23% con respecto al 22% del CBC. En R25 y R40 se observa que, a menor área, se tiene una menor reducción de la *ET*, obteniendo reducción de 9% en R25 y 8% en R40 para el segundo periodo, en comparación a la reducción de 12% del CBC. Mientras que, en S17_g123 y S17_g12 se observa también un aumento de la *ET*, con respecto al CBC, donde en el segundo periodo S17_g123 va de -19% a 7% y S17_g12 de -16% a 10%. Mientras que S17_cbc genera una mayor reducción de la *ET*, lo cual en el segundo periodo va de -2% a -26% (en comparación con los -22% a 3% del CBC). Luego, al igual que en Cachapoal, se aprecia que al plantar menor área y/o si se plantan cultivos más demandantes, se obtiene un aumento de *ET*, con lo que la reducción esperada se hace menor.

En cuanto a la *DE*, para el caso CBC se espera un aumento promedio de 3% en el periodo (2015-2039) y de 5% en el periodo (2040-2059). Los escenarios R40 y S7 son los que generan mayor reducción, el primero por ser una reducción importante de área y el segundo por la selección de celdas óptimas. Luego S11 presenta una reducción promedio de 10%, S17 de 8% y R25 de 7% en el periodo (2040-2059). Con ello, se aprecia que los escenarios S11, S17 y S17_cbc, a pesar de que reducen en menor medida el área que el R25, producen una reducción cercana a la del R25. Además, en este caso aumentar el área hasta la pendiente de 17° pero utilizando cultivos menos demandantes puede reducir con ello la demanda de riego. Finalmente, en el periodo (2040-2059) S17_g123 presenta un aumento de 12% a 15% y S17_g123 de 20% a 23%.

Por ello, para Tinguiririca se tiene mayor reducción seleccionando el escenario S7 o bien el R40, luego si se desea una reducción media de la demanda se puede seleccionar S11, S17 o S17_cbc.

5.5.3 Resultados escenarios: cambio a nivel estacional

En esta sección se compara el cambio de las variables *E*, *P*, *ET* y *DE* en los periodos futuros (2015-2039 y 2040-2059) con respecto al periodo histórico (1985-2014), considerando los valores mensuales promedios de cada mes. Este análisis, se aplica solo para el escenario CBC, por no apreciarse diferencias significativas con los otros escenarios. Con ello, en Figura 5.17, en (A) se presenta la climatología de la Cuenca de Cachapoal para el CBC en el periodo histórico (1985-2014), donde en línea continua se presenta los valores medios y en sombra el delta de error de los datos de cada año del periodo histórico. En B y C, se presenta el cambio del monto mensual de cada variable en los periodos futuros (2015-2039

y 2040-2059, respectivamente), con respecto al promedio del periodo histórico, considerando los cuatro GCMs. Luego en (B) se presenta el mismo formato para Tinguiririca.

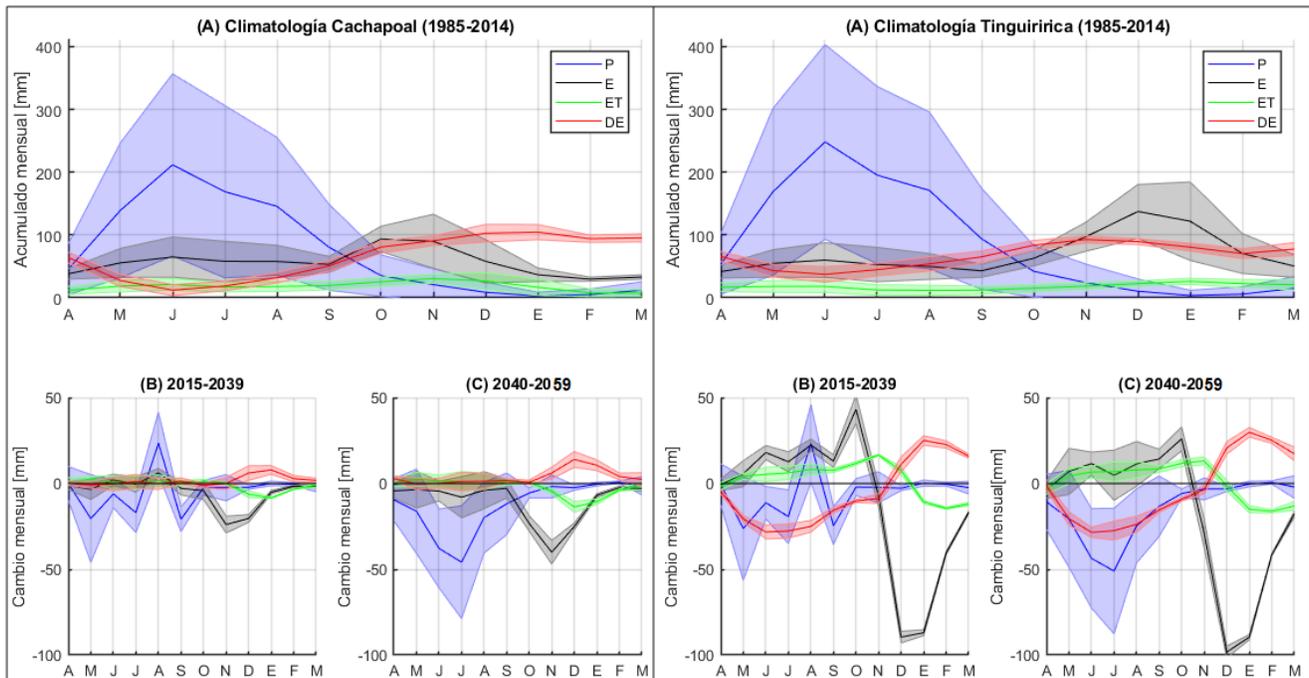


Figura 5.17: Para cada subcuenca se presenta en (A) la climatología , en (B) el cambio en el periodo (2015-2039) con respecto al periodo histórico y en (C) el cambio en el periodo (2040-2059) con respecto al promedio del periodo histórico. La sombra representa los valores de cada año del periodo respectivo.

En la Figura 5.17 , para la subcuenca de Cachapoal, en (A) es posible apreciar, que la *P* alcanza en promedio los 200 mm/mes en junio, presentándose principalmente entre abril y octubre. La *E* presenta su máximo valor entre octubre y noviembre llegando a los 100 mm/mes y apreciándose un segundo máximo en junio de 70 mm/mes, lo que verifica el régimen nivo-pluvial de la subcuenca. La *DE* tiene su mínima en el mes de junio y entre octubre-marzo se encuentra sus valores máximos cercanos a los 100 mm/mes. En los meses de julio la *DE* es cercana a 0 por la presencia de precipitación, al tener la *ET* muy cercana a las *PET*.

En (B) se presenta una disminución de *P* principalmente, siendo el mes de mayo el de mayor magnitud, mientras que en agosto se observa un aumento. La *E* presenta disminución en noviembre y diciembre. La *DE* presenta un aumento en el mes de diciembre y la *ET* en el mismo mes presenta déficit.

En (C) se presenta una disminución de *P*, siendo el mes de julio el de mayor magnitud. La *E* presenta disminución en el mes de noviembre. En este periodo, el aumento de la *DE* en el mes de diciembre es mayor, al igual que el déficit de la *ET*.

En la subcuenca de Cachapoal se espera un déficit de *P* en los meses preferentes de lluvias (de abril a septiembre), presentando un leve aumento en las precipitaciones en agosto para el periodo (2015-2039).

Y se proyecta una disminución de la E de deshielo en los meses de septiembre a octubre, que hoy en día es un aporte importante para suplir la demanda de riego en estos meses.

Para la subcuenca de Tinguiririca en (A) se aprecia un mayor nivel de precipitaciones que en Cachapoal, estas se presentan entre los meses de abril a octubre. El valor máximo se presenta en el mes de junio, cuyo valor medio es cerca de 250 mm/mes. La E presenta su mayor magnitud en el mes de diciembre de 140 mm/mes, observándose también un valor máximo en el mes junio, de cerca de 70 mm/mes, lo que ratifica el régimen nivo-pluvial de la cuenca. El máximo de la DE se encuentra entre los meses de diciembre a enero. Y la ET presenta valores relativamente constantes durante todo el año.

En (B) se presenta una disminución de P principalmente, siendo el mes de mayo el de mayor magnitud, mientras que en agosto se observa un aumento. La E presenta disminución en noviembre y diciembre, de mayor magnitud que en la subcuenca de Cachapoal. La DE presenta un aumento en el mes de diciembre a marzo, y se aprecia una reducción de DE entre los meses de marzo a agosto. De manera inversa, la ET aumenta de marzo a noviembre y se reduce en febrero.

En (C) se presenta una disminución de P , siendo el mes de julio el de mayor magnitud. La E presenta un aumento entre los meses de mayo a octubre, para luego reducir en mayor magnitud en diciembre y enero. La DE y ET presentan un comportamiento similar al analizado en (B), sin embargo, se incrementan las magnitudes de dichos cambios.

En la subcuenca de Tinguiririca se espera un déficit de P en los meses preferentes de lluvias (de abril a septiembre), presentando un leve aumento en las precipitaciones en agosto, al igual que en Cachapoal. Se proyecta una disminución de la E de deshielo en los meses de septiembre a octubre, lo que va acompañado de un aumento en menor medida durante los meses de invierno. De este modo, que al igual que en Cachapoal, se proyecta un déficit en los meses de mayor demanda de riego.

5.5.4 Análisis de la demanda evapotranspirativa y escorrentía de los escenarios planteados.

En la Figura 5.18 se presenta para cada subcuenca, la escorrentía generada en cada escenario en términos de volumen anual para cada periodo (en Mm^3).

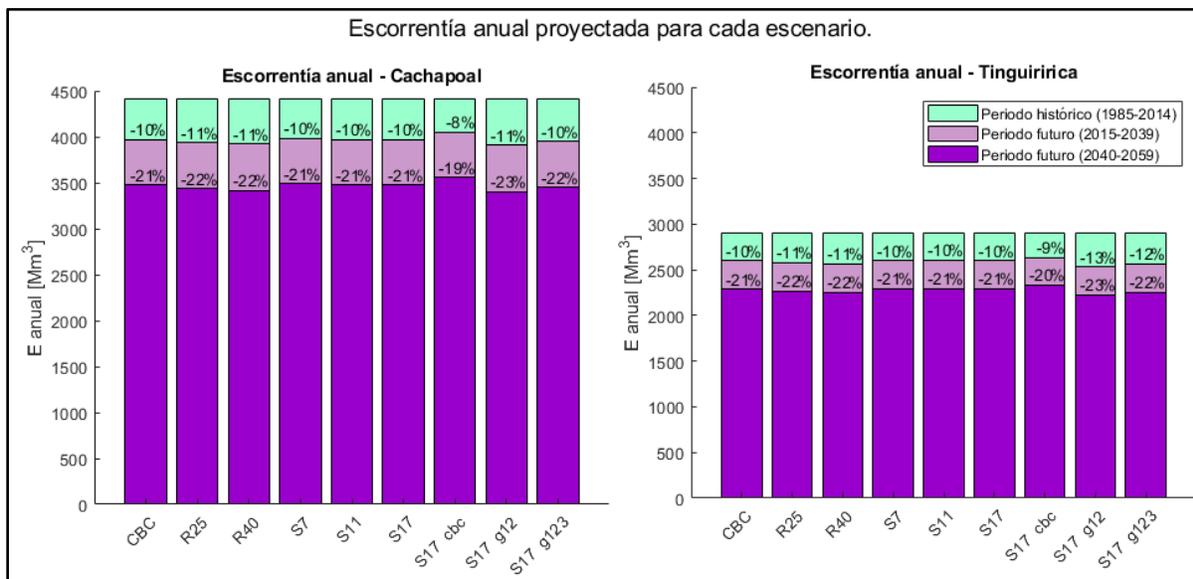


Figura 5.18: Volumen de escorrentía (en Mm^3), en cada periodo. Y en el interior de las barras se presenta el porcentaje de cambio la escorrentía futura respecto al periodo histórico (1985-2015).

A partir de la Figura 5.18, en la subcuenca de Cachapoal se aprecia una escorrentía histórica de 4.500 [Mm^3], luego entre escenarios no se presentan diferencias significativas, donde para el periodo (2015-2039) se aprecia que la escorrentía se reduce a 4.000 [Mm^3], y en (2040-2059) a 3.500 [Mm^3]. Mientras que en la subcuenca de Tinguiririca se aprecia una escorrentía histórica de cerca de 2.850 [Mm^3], luego entre escenarios tampoco se presentan diferencias significativas, donde para el periodo (2015-2039) se aprecia que la escorrentía se reduce a 2.650 [Mm^3] y en (2040-2059) a 2.450 [Mm^3].

En ambas subcuencas, ordenando los escenarios según reducción de escorrentía se tiene:

$$S17_g12 > S17_g123 \approx R40 \approx R25 > CBC \approx S7 \approx S11 \approx S17$$

En la Figura 5.19 se presenta la demanda evapotranspirativa acumulada, para la subcuenca de Cachapoal y Tinguiririca, donde en línea continua se representa el valor promedio en el periodo (2015-2039) y como punto se presenta el valor promedio en el periodo (2040-2060), cuyos colores están asociados a los escenarios planteados.

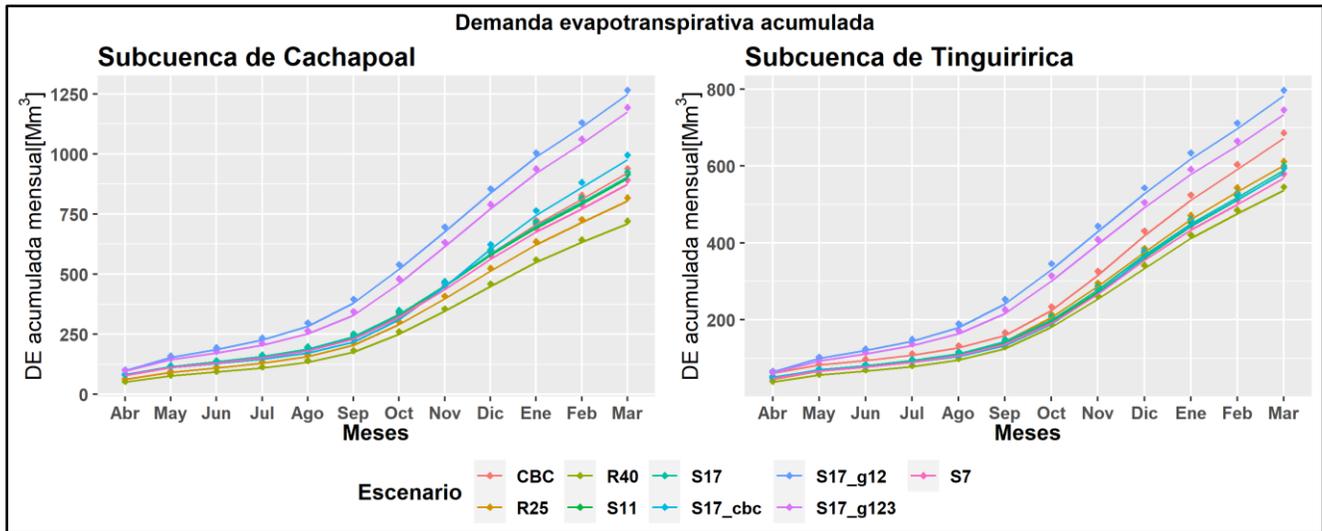


Figura 5.19: Demanda evapotranspirativa futura acumulada mensual para cada escenario. Donde en línea continua se representa el valor promedio en el periodo (2015-2039) y como punto se presenta el valor promedio en el periodo (2040-2059).

En la Figura 5.19 se aprecia que desde septiembre se produce un cambio de pendiente en la curva acumulada, lo que representa al inicio del ciclo de riego. Tanto en Cachapoal como Tinguiririca se identifica el escenario S17_g12 como el más demandante, seguido del S17_g123, mientras que el escenario R40 es el de menor demanda evapotranspirativa. Además, se aprecia que no existen diferencias significativas entre el periodo (2015-2039) y el periodo (2040-2060).

Para identificar la relación de jerarquía en cuanto a demanda evapotranspirativa entre los escenarios, se presentan la Figura 5.20 y la Figura 5.21, donde en el gráfico izquierdo se presentan la demanda anual para el periodo histórico y los periodos futuros (2014-2039 y 2040-2069), y en el gráfico de la derecha se presenta la demanda mensual para el promedio del periodo histórico (2015-2059), para la subcuenca de Cachapoal y Tinguiririca, respectivamente.

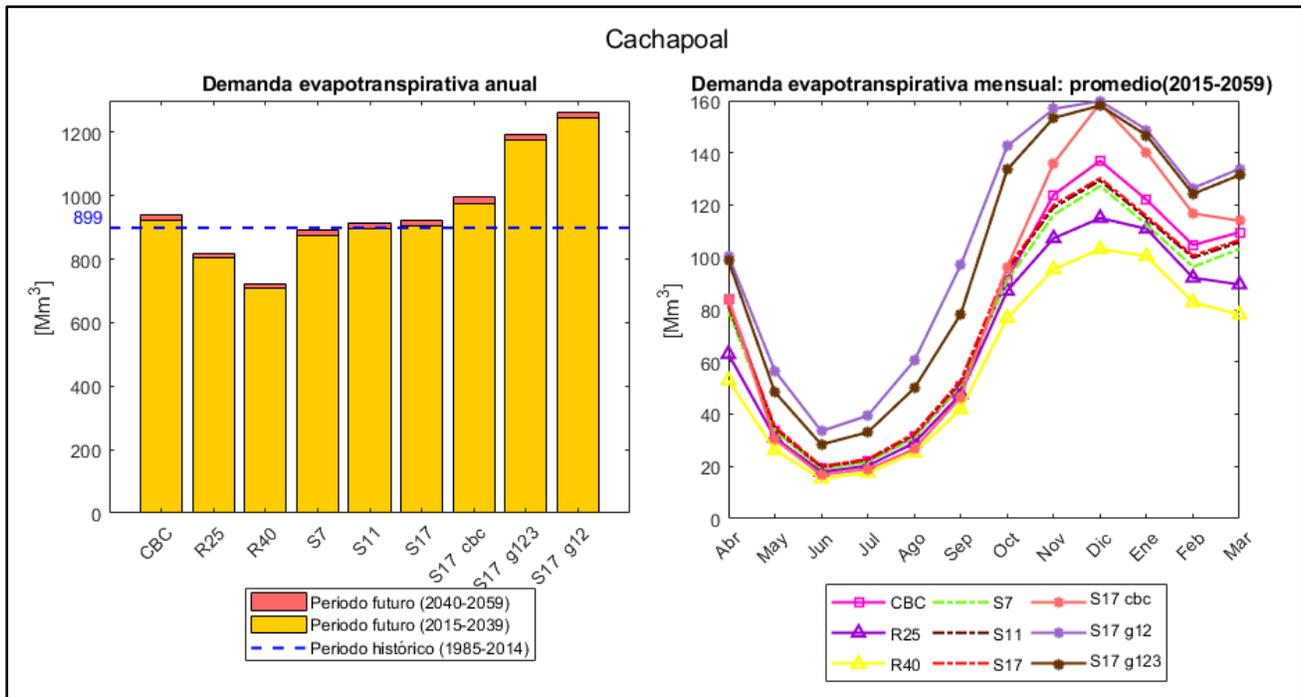


Figura 5.20: Demanda evapotranspirativa de cada escenario futuro de la subcuenca Cachapoal.

A partir de la Figura 5.20 se aprecia en la subcuenca de Cachapoal, que la demanda evapotranspirativa presenta su mínimo en el mes de junio, mientras que entre octubre y marzo se identifican la mayor demanda, con máximo en el mes de diciembre. Ordenando los escenarios según su demanda evapotranspirativa anual, se tiene lo siguiente:

$$S17_g12 > S17_g123 > S17_cbc > CBC \approx S17 \approx S11 > S7 > R25 > R40$$

Como se observa en el gráfico de la demanda anual, la demanda evapotranspirativa del CBC en el periodo histórico es de 899 [Mm³] y en el periodo futuro se incrementa. Se aprecia, que solo los escenarios R25, R40 y S7, comprenden una reducción con respecto al valor de la demanda evapotranspirativa histórica, pero la reducción de S7 es pequeña.

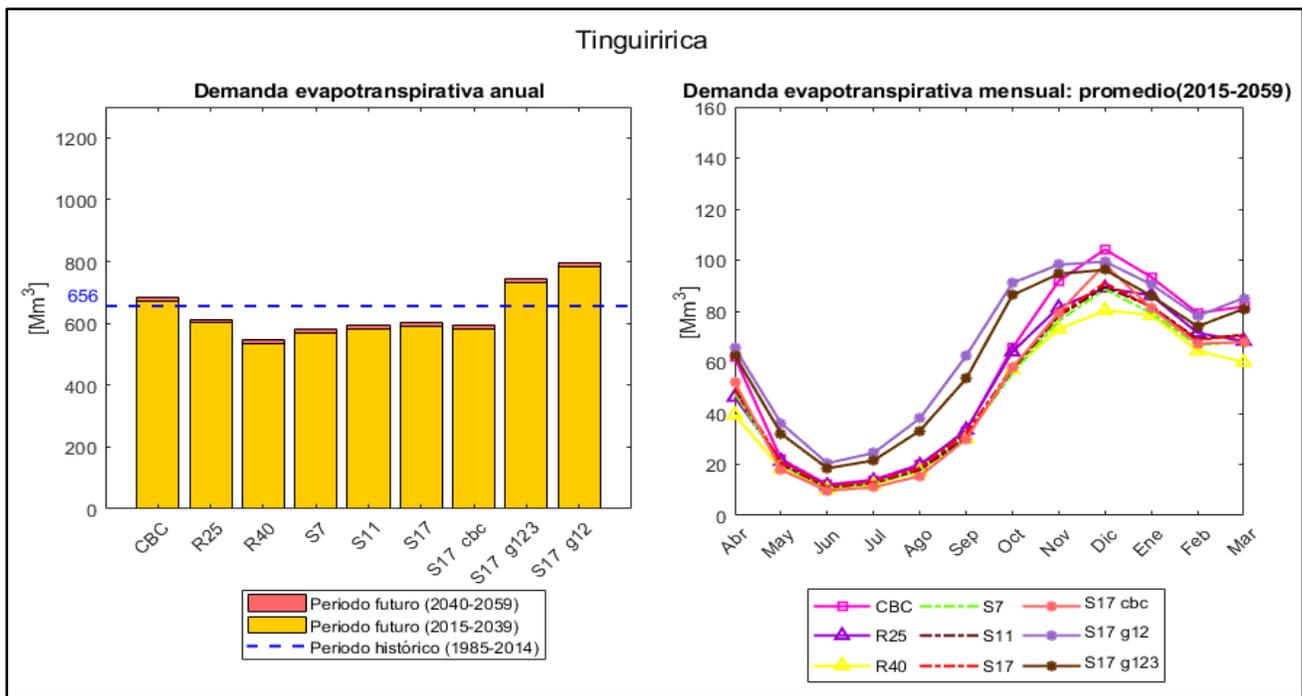


Figura 5.21: Demanda evapotranspirativa de cada escenario futuro de la subcuenca Tinguiririca.

En la Figura 5.21 se observa en la subcuenca de Tinguiririca, al igual que lo analizado para Cachapoal, que la demanda evapotranspirativa presenta su mínimo en el mes de junio, desde donde comienza a incrementarse, luego de octubre a marzo se identifican la mayor demanda, con máximo en el mes de diciembre. Luego, ordenando los escenarios según su demanda evapotranspirativa anual, se tiene lo siguiente:

$$S17_g12 > S17_g123 > CBC > R25 \approx S11 \approx S17 \approx S17_cbc > S7 > R40$$

Además, como se observa en el gráfico de la demanda anual, la demanda evapotranspirativa del CBC en el periodo histórico corresponde a 656 [Mm³], con lo cual se aprecia que el CBC en el periodo futuro se incrementa, y solo los escenarios S17_g12 y S17_g123, comprende un aumento de la demanda evapotranspirativa con respecto a este nivel histórico, mientras que el resto de los escenarios reducen la demanda evapotranspirativa con respecto a dicho nivel.

5.5.5 Balance entre disponibilidad y demanda hídrica total.

A partir de la Figura 5.21 y la Figura 5.22, se observa que las demandas evapotranspirativas anuales de los escenarios no superan los 1.250 [Mm³] en Cachapoal y los 800 [Mm³] en Tinguiririca. Y del valor anual de escorrentía de cada escenario, en la Figura 5.18 se aprecia que en la subcuenca de Cachapoal los escenarios no superan los 3.500 [Mm³] y en Tinguiririca no superan 2.300 [Mm³], lo cual demuestra que existe disponibilidad hídrica en términos anuales para suplir la demanda evapotranspirativa. Sin embargo, en la Figura 5.21 y la Figura 5.22, se observan el ciclo anual de la demanda evapotranspirativa, en donde se tiene mayor demanda entre octubre y marzo. Esto unido a la información que nos reporta la Figura 5.17, en donde para ambas subcuencas en el periodo futuro se espera reducción de la escorrentía de deshielo, se hace necesario relacionar disponibilidad y demanda a nivel estacional, considerando además las demandas de otros usos, no agrícolas. Por ello se analiza la disponibilidad dada por la

escorrentía versus la demanda hídrica total, la cual se estima como la suma de la demanda evapotranspirativa simulada en el modelo VIC y la suma de los derechos superficiales consuntivos de otros usos diferentes al de riego, registrados en la DGA.

Para conocer los derechos de aprovechamiento de la zona de estudio, se utilizó el trabajo de Budde et al. (2019), en donde se obtienen los derechos agrupados por subcuenca. Para este análisis, se utilizan solo los derechos consuntivos y que poseen información en caudal. Con ello en la Tabla 5.9 y Tabla 5.10 se presenta el volumen anual de cada tipo de uso, lo que incluye aguas subterráneas y superficiales, para la cuenca de Cachapoal y Tinguiririca, respectivamente.

Tabla 5.9: Estimación consumo anual a partir de derechos consuntivos para la subcuenca de Cachapoal, en Mm^3 al año.

Derechos superficiales consuntivos	Riego	Uso doméstico/ saneamiento/ bebida	Industrial	Minero	Otros	Sin declarar	Hidroeléctrico
Aguas	Mm^3	Mm^3	Mm^3	Mm^3	Mm^3	Mm^3	Mm^3
Subterráneas	271	463	3	-	3	666	-
Superficiales	935	36	0	63	1.037	501	-
Total	1.207	499	3	63	1.041	1.167	-

Tabla 5.10: Estimación consumo anual a partir de derechos consuntivos para la subcuenca de Tinguiririca, en Mm^3 al año.

Derechos superficiales consuntivos	Riego	Uso doméstico/ saneamiento/ bebida	Industrial	Minero	Otros	Sin declarar	Hidroeléctrico
Aguas	Mm^3	Mm^3	Mm^3	Mm^3	Mm^3	Mm^3	Mm^3
Subterráneas	269	303	8	-	0	483	-
Superficiales	661	0	0	-	-	429	-
Total	929	303	8	-	0	912	-

De la Tabla 5.9 se aprecia que para Cachapoal se tiene un total de 1.207 [Mm^3] de derechos asociados a riego, los cuales 271 [Mm^3] son de aguas subterráneas y 935 [Mm^3] de aguas superficiales, lo cual en comparación a la demanda evapotranspirativa histórica del CBC de 899 [Mm^3], se observa que es bastante similar a los derechos superficiales asociados a riego. Luego para el caso de Tinguiririca en la Tabla 5.10, se tiene un total de 929 [Mm^3] de derechos asociados a riego, los cuales 269 [Mm^3] son de aguas subterráneas y 661 [Mm^3] de aguas superficiales, lo cual en comparación a la demanda evapotranspirativa histórica del CBC de 656 [Mm^3], se observa también similitud para el caso de aguas superficiales, considerando que el modelo VIC realiza el balance a nivel de agua superficial sin considerar la modelación del aguas subterráneas.

Por otra parte, analizando los volúmenes totales, del uso doméstico/ saneamiento/bebida se aprecia un volumen de 499 [Mm^3] en Cachapoal y de 303 [Mm^3] en Tinguiririca, lo cual es menor al consumo de los usos de riego, pero depende en gran medida del agua subterránea. En Cachapoal se identifica uso

minero mientras que derechos hidroeléctricos no figuran, debido a que solo se consideran los derechos consuntivos.

Luego en la Tabla 5.11 y Tabla 5.12 se presenta el detalle mensual de los derechos consuntivos superficiales, para la cuenca de Cachapoal y Tinguiririca, respectivamente.

Tabla 5.11: Estimación consumo mensual a partir de derechos consuntivos para la subcuenca de Tinguiririca, en Mm³ al mes.

Derechos superficiales consuntivos	Riego	Uso doméstico/saneamiento/bebida	Industrial	Minero	Otros	Sin declarar	Hidroeléctrico
Meses	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³
Abril	76	3	0	3	85	40	-
Mayo	79	3	0	11	88	42	-
Junio	79	3	0	10	85	41	-
Julio	81	3	0	11	88	42	-
Agosto	81	3	0	11	88	44	-
Septiembre	76	3	0	3	85	43	-
Octubre	79	3	0	3	88	44	-
Noviembre	76	3	0	3	85	43	-
Diciembre	79	3	0	3	88	44	-
Enero	79	3	0	3	88	42	-
Febrero	73	3	0	2	82	36	-
Marzo	79	3	0	3	88	42	-
Anual (Mm ³)	935	36	0	63	1037	501	-

Tabla 5.12: Estimación consumo mensual a partir de derechos consuntivos para la subcuenca de Tinguiririca, en Mm³ al mes.

Derechos superficiales consuntivos	Riego	Uso doméstico/ saneamiento/ bebida	Industrial	Minero	Otros	Sin declarar	Hidroeléctrico
Meses	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³
Abril	53	0	0	0	0	36	-
Mayo	55	0	0	0	0	36	-
Junio	53	0	0	0	0	36	-
Julio	55	0	0	0	0	36	-
Agosto	55	0	0	0	0	36	-
Septiembre	63	0	0	0	0	36	-
Octubre	55	0	0	0	0	36	-
Noviembre	53	0	0	0	0	36	-
Diciembre	55	0	0	0	0	36	-
Enero	55	0	0	0	0	36	-
Febrero	52	0	0	0	0	36	-
Marzo	55	0	0	0	0	36	-
Anual (Mm ³)	661	0	0	0	0	429	-

La suma de los derechos consuntivos superficiales de todos los usos (excluyendo el uso de riego) presentados en las Tabla 5.11 y Tabla 5.12, son añadidos a las demandas evapotranspirativas de cada escenario (presentadas en la Figura 5.19 y la Figura 5.20). Esta sumatoria se denomina “demanda hídrica total superficial”.

Con ello, se presentan las Figura 5.22 y Figura 5.23, las cuales comparan a nivel de volumen mensual, la escorrentía disponible y la demanda hídrica total superficial de cada escenario. En estas figuras, se presenta un balance para los periodos (2015-2039 y 2040-2059), en donde la escorrentía futura se representa como gráfico de área, en donde a partir de los cuatro GCMs se obtiene un valor mínimo y máximo para la escorrentía, cuyos valores se presentan como límites. Mientras que la escorrentía histórica se presenta como línea segmentada de color azul. Cabe señalar que la escorrentía corresponde a la simulada solo con el escenario CBC, debido a que en el análisis anual de la escorrentía se observa diferencias poco significativas entre los escenarios.

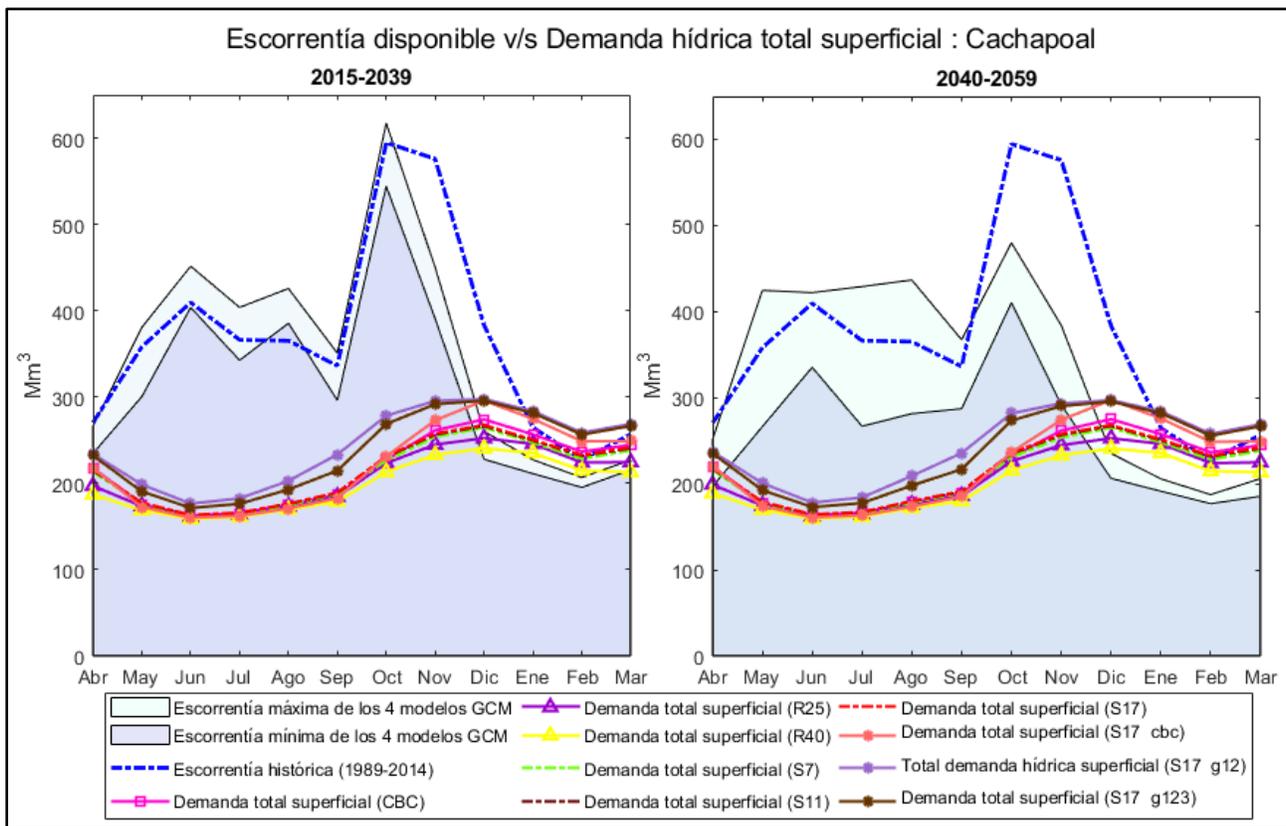


Figura 5.22: Balance entre escorrentía disponible y demanda hídrica total superficial para la cuenca del Cachapoal.

En la Figura 5.22 se observa que la escorrentía histórica de mayo a septiembre se ubica en los límites de la escorrentía futura, para ambos periodos. Luego, en el periodo (2040-2059) se aprecia una mayor dispersión del valor de la escorrentía en los meses de mayo a septiembre. Además, en el periodo (2015-2039) se aprecia que a partir del mes de octubre la escorrentía futura es menor a la histórica, mientras que para el periodo (2040-2059), esto ocurre antes, en el mes de septiembre, presentándose una reducción del caudal de deshielo de mayor magnitud.

En cuanto a la demanda evapotranspirativa, en el periodo (2015-2039) se aprecia, que existe déficit de escorrentía desde el mes de diciembre a marzo, donde en el mes de diciembre, solo los escenarios R25 y R40 están bajo el límite superior de la escorrentía futura, sin embargo, de enero a marzo todos los escenarios presentan déficit.

Luego, en el periodo de (2040-2059) se tiene que desde diciembre a marzo se presenta déficit para todos los escenarios planteados.

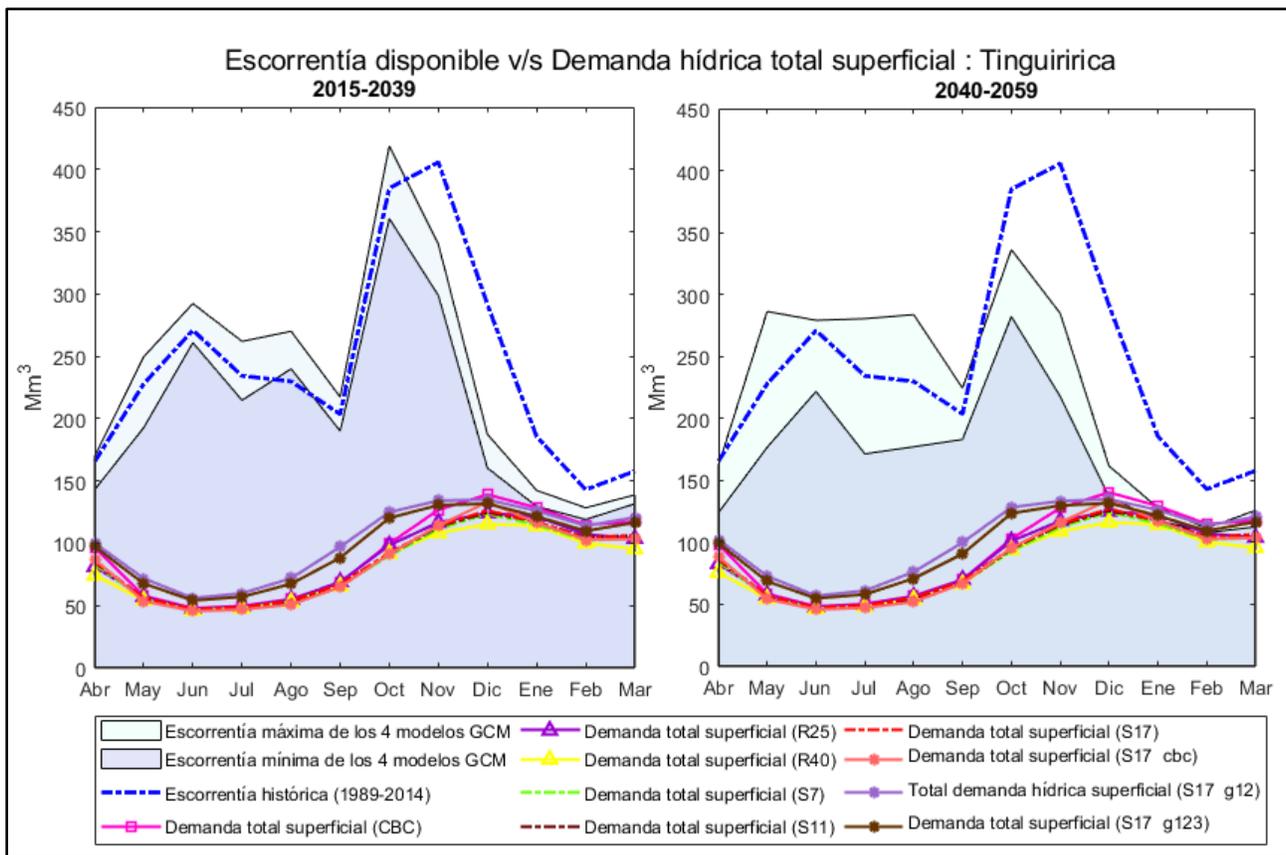


Figura 5.23: Balance entre escorrentía disponible y demanda hídrica total superficial para la cuenca del Tinguiririca.

En la Figura 5.23 para Tinguiririca, de la misma forma que Cachapoal, se observa que la escorrentía histórica de mayo a septiembre se ubica en los límites de la escorrentía futura de ambos periodos futuros. Además, se observa una mayor dispersión del valor de la escorrentía en los meses de mayo a septiembre para el periodo (2040-2059), al igual que Cachapoal. En el periodo (2040-2059) se aprecia que a partir del mes de octubre la escorrentía futura es menor a la histórica, mientras que para el periodo (2040-2059), esto ocurre antes, en el mes de septiembre, al igual que Cachapoal.

En cuanto a la demanda evapotranspirativa, en el periodo (2015-2039) se aprecia, que no existe déficit, incluso en los meses de mayor demanda. Sin embargo, en el periodo de (2040-2059) se tiene que desde diciembre a marzo se logra suplir la demanda, pero de manera acotada, donde los escenarios CBC, S17_g12 y S17_g123, en los meses de enero y febrero pasan a tener déficit. Cabe notar que en cuanto a volumen anual, el escenario S17_g123 tiene mayor demanda evapotranspirativa que el CBC, sin embargo, como se aprecia en la Figura 5.13 en el mes de noviembre el escenario CBC comienza a superar el escenario S17_g123, lo cual está ligado al cambio en la estacionalidad de los cultivos de los grupos 1, 2 y 3 con respecto a los cultivos del CBC.

Además, en el periodo de (2040-2059) se aprecia que solamente el escenario R40 se encuentra en el límite inferior de la escorrentía futura proyectada, por lo que sería recomendable en cualquier situación.

6 CONCLUSIONES

Sobre parámetros vegetacionales

Entre los parámetros vegetacionales, el parámetro *Rmin* es el parámetro vegetacional más sensible del modelo, afectando a la *ET*, *PET* y *E*. En base a esto, se recomienda una medición de este parámetro, solo en el caso de que se requiera un estudio más detallado de la demanda evapotranspirativa de algún cultivo en particular. Para balances hídricos en cuencas de área extensas, es difícil realizar una serie de mediciones en cada una de las zonas y ver cómo varía este parámetro, sin embargo, se recomienda utilizar datos propios por cultivos, ya que según Dickinson et al. (1993) *Rmin* es un parámetro de alta variación debido múltiples factores, como la clase de cultivo, el tipo de riego y clima, entre otros.

Además, del análisis de sensibilidad se identifica que los parámetros *Root_depth* y *Root_fracction* presentan alto índice de variación. Por ende, se recomienda definir estos parámetros por cultivo, en base a los estudios desarrollados de distribución de raíces.

Sobre problema ET y PET

En cuanto a la simulación de la evapotranspiración en el modelo VIC, en caso de cultivos no permanentes como cultivos anuales u hortalizas, no se simula correctamente la evaporación del suelo desnudo, la evaporación de la cubierta y la transpiración. La evaporación del suelo desnudo solo depende de la fracción cultivada que se impone por celda, pero no varían mensualmente, representando una dificultad del modelo. Por su parte, en la evaporación de la cubierta y en la transpiración, tampoco es posible inducir que sean nulas en ciertos meses. Para solucionar este comportamiento, se recomienda ajustar un *LAI* mínimo en los periodos en que no se planta el cultivo, lo cual efectivamente permite reducir la transpiración y la evaporación de la cubierta. Sin embargo, el comportamiento de evaporación del suelo desnudo no es ajustado en este trabajo.

Además, se advierte que en eventos de precipitación (ver Figura 5.13), la *ET* supera a la *PET*, en particular en la transpiración. Esto ocurre debido a que el factor de estrés hídrico es más preponderante que el parámetro *LAI* en la ecuación 2.13, y esta preponderancia del factor de estrés hídrico puede deberse a problemas en la estimación de los parámetros de suelo, en particular, punto de marchitez y el punto crítico. Por ello, se recomienda una adecuada estimación de estos parámetros.

Sobre análisis individual de cultivos

Se concluye que la escorrentía está ligada a la precipitación en mayor medida que al uso de suelo. En el análisis por cultivo, se aprecian diferencias de escorrentía de hasta 200 mm/año, donde en los extremos se tiene al palto con 500 mm/año y al poroto granado con 500 mm/año. Por su parte, la demanda evapotranspirativa de los cultivos varía desde 350 mm hasta 1250 mm, siendo el palto el más demandante perteneciente al grupo 1, y el pimiento el menos demandante.

La evapotranspiración al igual que la escorrentía depende de la precipitación, de modo que son mayores en años húmedos, mientras que la demanda evapotranspirativa en años secos aumenta y en años húmedos se reduce.

Los cultivos recomendables, de demanda media a baja, corresponden a los del grupo 4, 5, 6, 7 y 8, por lo que se recomienda potenciar su desarrollo. En ello, es relevante que dichos grupos comprenden tanto frutales como hortalizas y cultivos anuales.

En cuanto a las zonas óptimas, se identifica la zona de valles como óptimas en general, dejando a fuera los sectores de mayor cota, tanto para cultivos frutales-viñedos como para hortalizas-anuales.

Proyecciones para ambas cuencas

En Cachapoal se proyecta una reducción de precipitación cercana a 5% a 6% en los años 2015-2039 y de 7% a 27%, para 2040-2059. Mientras que la escorrentía se proyecta una reducción de un 8% a 13% para 2015-2039 y de 11% a 30% para 2040-2059, luego para Tinguiririca se proyectan valores similares. Además, en ambas subcuencas, se espera déficit de la precipitación con respecto al periodo histórico, en los meses preferentes de lluvias (de abril a septiembre), presentando un leve aumento en las precipitaciones en agosto. Se proyecta la disminución de la escorrentía de deshielo en los meses de septiembre a octubre, lo que va acompañado de un aumento en menor medida de la escorrentía durante los meses de invierno, para Tinguiririca. En particular, la reducción de la escorrentía se proyecta que se inicie en el mes de octubre para 2015-2039, y en septiembre para 2040-2059.

Análisis diferencia entre la escorrentía de los escenarios.

En cuanto a los resultados de los escenarios planteados, para el periodo futuro se estima una reducción de la evapotranspiración, ligado en gran medida a la reducción de la precipitación. Se distinguen diferencias en el nivel de reducción de acuerdo con los escenarios, en donde al plantar menor área y/o se plantan cultivos más demandantes, se obtiene un aumento de *ET*, con lo que la reducción proyectada se hace menor.

En la escorrentía, no se aprecian diferencias significativas entre los escenarios planteados, sin embargo, se aprecia que al tener una menor área cultivada y/o se seleccionan los cultivos más demandantes se tiene una reducción mayor de la escorrentía, pero esto solo significa un cambio de 1% a 3%. En esto es útil notar que solo se está variando cerca del 20% del área total de la cuenca, por lo que el cambio en otras especies vegetaciones, tales como bosques, pastizales, y matorrales, pueden ser útiles de estudiar, ya que comprenden el 48% del área de la cuenca. Los escenarios ordenados según reducción de escorrentía son los siguientes:

$$S17_g12 > S17_g123 \approx R40 \approx R25 > CBC \approx S7 \approx S11 \approx S17$$

Obviando las leves diferencias en la escorrentía para los escenarios futuros, en la subcuenca de Cachapoal se estima una escorrentía histórica de cerca de 4.500 [Mm³], mientras que para los años 2015-2039 se proyecta en 4.000 [Mm³] y en 2040-2059 cerca de 3.500 [Mm³]. Luego, en Tinguiririca, la escorrentía histórica es de cerca de 2.850 [Mm³], mientras que para 2015-2039 se proyecta en 2.650 [Mm³], y en 2040-2059 cerca de 2.450 [Mm³].

Análisis diferencia entre la demanda et de cada escenario.

En cuanto a la demanda evapotranspirativa se aprecian diferencias entre los escenarios, tanto para Cachapoal como para Tinguiririca, y se reporta un aumento de la demanda evapotranspirativa en el

futuro, lo que se explica por la proyección de reducción de la precipitación y aumento de la temperatura. Sin embargo, más relevante es la variación del escenario agrícola.

En la subcuenca de Cachapoal, ordenando los escenarios según su demanda evapotranspirativa anual, se tiene lo siguiente:

$$S17_g12 > S17_g123 > S17_cbc > CBC \approx S17 \approx S11 > S7 > R25 > R40.$$

En ello se destaca el S7, que comprende un aumento de 3% de área con respecto al CBC, sin embargo, reporta menor demanda que se explica por la utilización de celdas óptimas. Por último, los únicos escenarios de reducción de demanda evapotranspirativa, comprenden los escenarios S7, R25 y R40, porque R25 y R40 están ligados a la reducción de área y S7 a la utilización de celdas óptimas.

Luego, para Tinguiririca ordenando los escenarios según su demanda evapotranspirativa anual, se tiene lo siguiente:

$$S17_g12 > S17_g123 > CBC > R25 \approx S11 \approx S17 \approx S17_cbc > S7 > R40.$$

Los escenarios R40 y S7 son los que generan mayor reducción, el primero por ser una reducción importante de área y el segundo por la selección de celdas óptimas. Los escenarios S11, S17 y S17_cbc, logran reducir la demanda al mismo nivel que R25. Así mantener una matriz de cultivos adecuada como es la fracción del CBC de Tinguiririca o bien cultivar en celdas óptimas, logra reducir la demanda al mismo nivel que realizar una reducción drástica de cultivos. Por ello, para Tinguiririca se tiene mayor reducción seleccionando el escenario S7 o bien el R40, luego si se desea una reducción media de la demanda se puede seleccionar S11, S17 o S17_cbc.

Análisis balance entre disponibilidad y demanda hídricas total

En cuanto a la comparativa con los derechos de aprovechamiento de la DGA, se concluye que los valores de demanda evapotranspirativa del CBC, resultan ser similares a la suma de derechos consuntivos superficiales de uso de riego, esto para cada subcuenca.

Luego, en la comparación entre disponibilidad y demanda hídrica total, para Cachapoal, se concluye que para 2015-2039 se estima déficit entre enero y marzo para todos los escenarios, luego para 2040-2059 entre diciembre a marzo se presenta déficit para todos los escenarios planteados. Por lo que, para esta cuenca es necesario considerar otras medidas de distribución del agua, de modo de poder almacenar y posteriormente distribuirla.

En Tinguiririca, para 2015-2039 no se proyecta déficit de escorrentía, y para 2040-2059 entre diciembre a marzo se logra suplir la demanda de manera acotada, donde los escenarios CBC, S17_g12 y S17_g123 en los meses de enero y febrero pasan a tener déficit. El escenario R40 se mantiene en el límite inferior de la escorrentía, por lo cual se recomienda este escenario.

Recomendaciones

Por ello, a pesar de que Tinguiririca presenta escenarios en los cuales se alcanza a suplir la demanda, para 2040-2059 la demanda se suple de manera acotada, por lo que para ambas cuencas se recomienda utilizar los escenarios de menor demanda y el empleo de técnicas de almacenamiento de la escorrentía.

Además, se recomienda la variedad de cultivos, evitando los escenarios los monocultivos de especies demandantes como son los del grupo 1 o grupo 2. Se recomienda potenciar el desarrollo de los cultivos del grupo 4, 5, 6, 7, y 8.

Además, debido a que la ubicación al igual que la distribución es determinante en la elección de los escenarios agrícolas se recomienda para estudios posteriores, definir zonas óptimas bajo criterios más conservadores, de modo de tener zonas de cambio más marcado.

Finalmente, debido a que la reducción de escorrentía es relevante y esta se proyecta para el deshielo, lo que sumado al incremento de la demanda evapotranspirativa en los meses octubre a marzo analizado en la Figura 5.17, es urgente cambiar en cómo se ha utilizado el recurso hasta entonces, en donde se depende en gran medida de la escorrentía de deshielo. Por ello, se recomienda analizar medidas de almacenamiento, debido a que a nivel anual se presenta disponibilidad de recurso hídrico.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: FAO, 298, 0.
- Alvarez-Garretón, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., ... & Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies-Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5817-5846.
- Alves, I., & Pereira, L. S. (2000). Modelling surface resistance from climatic variables? *Agricultural Water Management*, 42(3), 371-385.
- Alves Júnior, J., Bandaranayake, W., Parsons, L. R., & Evangelista, A. W. (2012). Citrus root distribution under water stress grown in sandy soil of central Florida. *Engenharia Agrícola*, 32(6), 1109-1115.
- Apotikar, V. A., Jadhav, J. D., Pawar, P. B., Londhe, V. M., & Sharmila, S. (2012). Stomatal conductance and stomatal resistance studies in relation to haulm yield in potato. *Asian Journal of Bio Science*, 7(1), 62-70.
- Arrhenius, S. (1896). XXXI. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41(251), 237-276.
- ASF DAAC (2019), ALOS PALSAR Radiometric Terrain Corrected High res; © JAXA / METI 2011. Acceso a través de ASF DAAC 30 de abril de 2019.
- Augé, R. M., Toler, H. D., Sams, C. E., & Nasim, G. (2008). Hydraulic conductance and water potential gradients in squash leaves showing mycorrhiza-induced increases in stomatal conductance. *Mycorrhiza*, 18(3), 115-121.
- Bar-Tsur, A., Rudich, J., & Bravdo, B. (1985). Photosynthesis, transpiration and stomatal resistance to gas exchange in tomato plants under high temperatures. *Journal of horticultural science*, 60(3), 405-410.
- Bolandnazar, S., Aliasgarzad, N., Neishabury, M. R., & Chaparzadeh, N. (2007). Mycorrhizal colonization improves onion (*Allium cepa* L.) yield and water use efficiency under water deficit condition. *Scientia horticulturae*, 114(1), 11-15.
- Boulard, T., Jemaa, R., & Baille, A. (1996, September). Validation of a greenhouse tomato crop transpiration model in Mediterranean conditions. In *II International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops* 449 (pp. 551-560).
- Bower, J. P., Wolstenholme, B. N., & De Jager, J. M. (1977). Incoming solar radiation and internal water status as stress factors in avocado, *Persea americana* (Mill.) cv. Edranol. South African avocado growers' association Proceedings of the technical committee, 1, 35-40.
- Bower, J. P., Wolstenholme, B. N., & De Jager, J. M. (1977). Incoming solar radiation and internal water status as stress factors in avocado, *Persea americana* (Mill.) cv. Edranol. Proceedings of Technical Committee, South African Avocado Growers Association, 1977, 35-40.

- Bower, J. P. (1978). The effects of shade and water relations in the avocado cv Edranol. South African avocado growers' association research report, 2, 59-61.
- Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J. P., & Valdivieso, J. (2018). Projected hydroclimate changes over Andean basins in central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios. *Climatic Change*, 150(3-4), 131-147.
- Bryla, D. R., Banuelos, G. S., & Mitchell, J. P. (2003). Water requirements of subsurface drip-irrigated faba bean in California. *Irrigation Science*, 22(1), 31-37.
- Brown, P. 2014. Determination of root distribution, dynamics, phenology and physiology of almonds to optimize fertigation practices. En: Board of California's 40th Annual Almond Conference 2012. California. EEUU.
- Budde, N., Mendoza, P., Vasquez, N., Alvarez, C., & Barría, P. (2020). Diagnóstico de la información de derechos de agua en Chile, Santiago, Chile. XXIV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.
- Caspari, H. W., Green, S. R., & Edwards, W. R. N. (1993). Transpiration of well-watered and water-stressed Asian pear trees as determined by lysimetry, heat-pulse, and estimated by a Penman-Monteith model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 67(1-2), 13-27.
- Chootummatat, V., Turner, D. W., & Cripps, J. E. L. (1990). Water use of plum trees (*Prunus salicina*) trained to four canopy arrangements. *Scientia Horticulturae*, 43(3-4), 255-271.
- Cuo, L., Zhang, Y., Gao, Y., Hao, Z., & Cairang, L. (2013). The impacts of climate change and land cover/use transition on the hydrology in the upper Yellow River Basin, China. *Journal of Hydrology*, 502, 37-52.
- Dadhwal, V. K., Aggarwal, S. P., & Mishra, N. (2010). Hydrological simulation of Mahanadi river basin and impact of land use/land cover change on surface runoff using a macro scale hydrological model. na.
- Deng, S., Yin, Q., Zhang, S., Shi, K., Jia, Z., & Ma, L. (2017). Drip irrigation affects the morphology and distribution of olive roots. *HortScience*, 52(9), 1298-1306.
- Dettori, S. (1984, September). Leaf water potential stomatal resistance and transpiration response to different watering in almond, peach and "pixy" plum. In I International Symposium on Water Relations in Fruit Crops 171 (pp. 181-186).
- DGA (2004), Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivo de calidad. Cuenca del Río Rapel. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Realizado por: CADE-IDEPE Consultores en ingeniería.
- DGA (2018), Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas norte y centro. SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Realizado por: Fundación para la transferencia tecnológica Pontificia Universidad Católica de Chile.

- Díaz A., Balbontín C., González I., Sanchez I. (2010). Procesamiento de imágenes de satélite: Obtención de magnitudes biofísicas de la vegetación. Curso de especialista en SIG y teledetección. Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Castilla La Mancha. Albacete, España. Sección 4.4, Página 15.
- Dickinson, R. E. (1984). Modeling evapotranspiration for three-dimensional global climate models. *Climate processes and climate sensitivity*, 29, 58-72.
- Dickinson, R. E., Henderson-Sellers, A., & Kennedy, P. J. (1993). Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model. Technical note. [NCAR (National Center for Atmospheric Research)] (No. PB-94-106150/XAB; NCAR/TN--387+ STR). National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO (United States). Scientific Computing Div.
- Dorne, A. J., & Bligny, R. (1993). Physiological adaptation to subantarctic climate by the Kerguelen cabbage, *Pringlea antiscorbutica* R. Br. *Polar Biology*, 13(1), 55-60.
- Duguay C. y Ledrew E. (1992). Estimating surface reflectance and albedo over rugged terrain from Landsat-5 Thematic Mapper. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* -Enero 1992. 553 pp.
- Dunn, S. M., & Mackay, R. (1995). Spatial variation in evapotranspiration and the influence of land use on catchment hydrology. *Journal of Hydrology*, 171(1-2), 49-73.
- Erb, W. A., Draper, A. D., & Swartz, H. J. (1991). Combining ability for canopy growth and gas exchange of interspecific blueberries under moderate water deficit. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 116(3), 569-573.
- Fredericksen, T. S., Kolb, T. E., Skelly, J. M., Steiner, K. C., Joyce, B. J., & Savage, J. E. (1996). Light environment alters ozone uptake per net photosynthetic rate in black cherry trees. *Tree Physiology*, 16(5), 485-490.
- Fujii, J. A., & Kennedy, R. A. (1985). Seasonal changes in the photosynthetic rate in apple trees: A comparison between fruiting and nonfruiting trees. *Plant Physiology*, 78(3), 519-524.
- Gao, H; Tang, Q; Shi, X; Zhu, C; Bohn, T; Su, F; Sheffield, J; Pan, M; Lettenmaier, D; Wood, F. 2009. Water Budget Record from Variable Infiltration Capacity (VIC) Model Algorithm Theoretical Basis Document.
- García Nájera, J. M. (1954). Pendientes máximas admisibles en las tierras de cultivo y cálculo de las terrazas intermitentes con desagüe para la conservación del suelo (banquetas de infiltración). Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias. Madrid.
- Garcilazo, J. M. (2014). Manejo postcosecha de la alcachofa [en línea] <<https://studylib.es/doc/3165949/manejo-postcosecha-de-la-alcachofa>> [consulta: 1 Septiembre 2019]
- Garg, V., Aggarwal, S. P., Gupta, P. K., Nikam, B. R., Thakur, P. K., Srivastav, S. K., & Kumar, A. S. (2017). Assessment of land use land cover change impact on hydrological regime of a basin. *Environmental Earth Sciences*, 76(18), 635.

Garnier, E., & Berger, A. (1987). The influence of drought on stomatal conductance and water potential of peach trees growing in the field. *Scientia Horticulturae*, 32(3-4), 249-263.

Geospatial. (2020). ALOS PALSAR. [en línea] <<http://www.geospatial.com.co/imagenes-de-satelite/alos-palsar.html>> [consulta: 1 Marzo 2020]

Gil-Marín, J. A., Rodríguez, R., Jasso-Cantú, D., & Zermeño, A. (2006). Resistencia estomática, transpiración y potencial hídrico en sábila con diferentes condiciones ambientales. *Terra Latinoamericana*, 24(3), 355-365.

Gough, R. E. (2001). Color of plastic mulch affects lateral root development but not root system architecture in pepper. *HortScience*, 36(1), 66-68.

Greaves, A. J. (1985). Root distribution of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) in a deep sandy loam soil of the Te Puke district, New Zealand. *New Zealand journal of agricultural research*, 28(3), 433-436.

Green, S. R., McNaughton, K. G., & Clothier, B. E. (1989). Observations of night-time water use in kiwifruit vines and apple trees. *Agricultural and forest meteorology*, 48(3-4), 251-261.

Greene, E. M., Liston, G. E., & Pielke Sr, R. A. (1999). Relationships between landscape, snowcover depletion, and regional weather and climate. *Hydrological Processes*, 13(14-15), 2453-2466.

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1-2), 80-91.

HALL, A. E., CAMACHO-B, S. E., & KAUFMANN, M. R. (1975). Regulation of water loss by citrus leaves. *Physiologia Plantarum*, 33(1), 62-65.

Hammes, P. S., & De Jager, J. A. (1990). Net photosynthetic rate of potato at high temperatures. *Potato Research*, 33(4), 515-520.

Hengade, N., & Eldho, T. I. (2016). Assessment of LULC and climate change on the hydrology of Ashti Catchment, India using VIC model. *Journal of Earth System Science*, 125(8), 1623-1634.

Horton, R., Beese, F., & Wierenga, P. J. (1982). Physiological Response of Chile Pepper to Trickle Irrigation 1. *Agronomy Journal*, 74(3), 551-555.

Hrachowitz, M., Clark, M., P. (2017). Hess Opinions: The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology.

Hulugalle, N. R., & Willatt, S. T. (1987). Patterns of water uptake and root distribution of chilli peppers grown in soil columns. *Canadian journal of plant science*, 67(2), 531-535.

Hurkmans, R. T. W. L., Terink, W., Uijlenhoet, R., Moors, E. J., Troch, P. A., & Verburg, P. H. (2009). Effects of land use changes on streamflow generation in the Rhine basin. *Water resources research*, 45(6).

INDAP (2020). Estrategias Regionales de Competitividad por Rubro: Producción y Mercado del Ajo [en línea] <[https://www.indap.gob.cl/docs/default-source/default-document-library/4ajosexportacion-viregion\(matrices1-2-3\).pdf?sfvrsn=0](https://www.indap.gob.cl/docs/default-source/default-document-library/4ajosexportacion-viregion(matrices1-2-3).pdf?sfvrsn=0)> [consulta: 1 Septiembre 2019]

Información para el Desarrollo Productivo Ltda. (INFODEP) por Santibáñez, F. et al (2016). Elaboración de una base digital del clima comunal de Chile: línea base (1980-2010) y proyección al año 2050. Informe final Julio 2016. Elaborado en el marco del Proyecto "Tercera Comunicación Nacional sobre cambio climático". Ministerio del Medio Ambiente. Departamento de Cambio Climático.

IPCC (2013). Cambio Climático 2013: Bases Físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC, Suiza.

Johnson, L. F. (2003). Temporal stability of an NDVI-LAI relationship in a Napa Valley vineyard. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 9(2), 96-101.

Katerji, N., Hallaire, M., Menoux-Boyer, Y., & Durand, B. (1986). Modelling diurnal patterns of leaf water potential in field conditions. *Ecological modelling*, 33(2-4), 185-203.

Léllis, B. C., Pardo, J. J., Tarjuelo Martín Benito, J. M., Domínguez, A., & Martínez Romero, A. (2016). Evaluación cuantitativa y cualitativa del cultivo de ajo morado bajo aplicación optimizada de volúmenes limitados de agua de riego. In XXXIV Congreso Nacional de Riegos, Sevilla 2016. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica.

Lesczynski, D. B., & Tanner, C. B. (1976). Seasonal variation of root distribution of irrigated, field-grown Russet Burbank potato. *American Potato Journal*, 53(2), 69-78.

Liang, Xu, Lettenmaier, Dennis P. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*, vol. 99(D7). 14,415-14,428, jul. 1994.

Liu, W. T., Pool, R., Wenkert, W., & Kriedemann, P. E. (1978). Changes in photosynthesis, stomatal resistance and abscisic acid of *Vitis labruscana* through drought and irrigation cycles. *American Journal of Enology and Viticulture*, 29(4), 239-246.

Li, P., Tan, H., Wang, J., Cao, X., & Yang, P. (2019). Evaluation of water uptake and root distribution of cherry trees under different irrigation methods. *Water*, 11(3), 495.

Liu, Y., Zhang, X., Xia, D., You, J., Rong, Y., & Bakir, M. (2013). Impacts of land-use and climate changes on hydrologic processes in the Qingyi River watershed, China. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(11), 1495-1512.

Machado, R. M., & Maria do Rosário, G. O. (2005). Tomato root distribution, yield and fruit quality under different subsurface drip irrigation regimes and depths. *Irrigation Science*, 24(1), 15-24.

Manrique, E. G. (1999). Índice de vegetación. Aplicación del NDVI. In TELEDETECCIÓN. Avances y Aplicaciones. VIII Congreso Nacional de Teledetección. Albacete, España (pp. 217-219).

- Ma, L., Hou, C. W., Zhang, X. Z., Li, H. L., Wang, Y., & Han, Z. H. (2013). Seasonal growth and spatial distribution of apple tree roots on different rootstocks or interstems. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 138(2), 79-87.
- Mao, D., & Cherkauer, K. A. (2009). Impacts of land-use change on hydrologic responses in the Great Lakes region. *Journal of Hydrology*, 374(1-2), 71-82.
- Marhaento, H., Booij, M. & Hoekstra, A. (2018). Hydrological response to future land-use change and climate change in a tropical catchment, *Hydrological Sciences Journal*, 63:9, 1368-1385.
- Masmoudi, C. C., Ayachi, M. M., Gouia, M., Laabidi, F., Reguaya, S. B., Amor, A. O., & Bousnina, M. (2010). Water relations of olive trees cultivated under deficit irrigation regimes. *Scientia Horticulturae*, 125(4), 573-578.
- McAneney, K. J., & Judd, M. J. (1983). Observations on kiwifruit (*Actinidia chinensis* Planch.) root exploration, root pressure, hydraulic conductivity, and water uptake. *New Zealand journal of agricultural research*, 26(4), 507-510.
- Melo, A. S. D., Suassuna, J. F., Fernandes, P. D., Brito, M. E. B., Suassuna, A. F., & Aguiar Netto, A. D. O. (2010). Vegetative growth, stomatal resistance, photosynthetic efficiency and yield of watermelon plants under different water levels. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 32(1), 73-79.
- Michelakis, N., Vougioucalou, E., & Clapaki, G. (1993). Water use, wetted soil volume, root distribution and yield of avocado under drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 24(2), 119-131.
- MOP (2016) Atlas del Agua, A. (2016). Chile. Santiago.
- NeSmith, D. S. (1999). Root distribution and yield of direct seeded and transplanted watermelon. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 124(5), 458-461.
- Pielke, R. A., & Avissar, R. (1990). Influence of landscape structure on local and regional climate. *Landscape Ecology*, 4(2-3), 133-155.
- Poschenrieder, C., Gunse, B., & Barcelo, J. (1989). Influence of cadmium on water relations, stomatal resistance, and abscisic acid content in expanding bean leaves. *Plant Physiology*, 90(4), 1365-1371.
- Rakovec, O., Mizukami, N., Kumar, R., Newman, A. J., Thober, S., Wood, A. W., ... & Samaniego, L. (2019). Diagnostic Evaluation of Large-domain Hydrologic Models calibrated across the Contiguous United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Renquist, A. R., Breen, P. J., & Martin, L. W. (1982). Stomatal behavior and leaf water status of strawberry in different growth environments. *Scientia Horticulturae*, 18(2), 101-110.
- Rosati, A., Metcalf, S. G., Buchner, R. P., Fulton, A. E., & Lampinen, B. D. (2006). Physiological effects of kaolin applications in well-irrigated and water-stressed walnut and almond trees. *Annals of botany*, 98(1), 267-275.

Rufato, L., Machado, B. D., Magro, M., Souza, D. S., Kretschmar, A. A., Sander, G. F., ... & Hipólito, J. S. (2016, August). Root distribution, vigor and productivity of European pear grafted on quince rootstocks. In XI International Symposium on Integrating Canopy, Rootstock and Environmental Physiology in Orchard Systems 1228 (pp. 279-284).

Saugier, B., & Katerji, N. (1991). Some plant factors controlling evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 54(2-4), 263-277.

Shinohara, T., & Leskovar, D. I. (2014). Effects of ABA, antitranspirants, heat and drought stress on plant growth, physiology and water status of artichoke transplants. *Scientia Horticulturae*, 165, 225-234.

Shuttleworth, W. J. (1993). Evaporation, *Handbook of Hydrology*, edited by: Maidment, DR.

Singh Sidhu, L., & Kaundal, G. S. (2003, October). Effect of planting density on fruit yield, foliar nutrient content and root distribution of plum (*Prunus salicina* Lindl.) cv. Satluj Purple. In VII International Symposium on Temperate Zone Fruits in the Tropics and Subtropics-Part Two 696 (pp. 299-302).

Spiers, J. M. (1998, August). Influence of cultural practices on root distribution of 'Gulfcoast' blueberry. In XXV International Horticultural Congress, Part 3: Culture Techniques with Special Emphasis on Environmental Implications, 513 (pp. 247-254).

Stull, R. B. (1999). An introduction into boundary layer meteorology.

Subramanian, K. S., Charest, C., Dwyer, L. M., & Hamilton, R. I. (1995). Arbuscular mycorrhizas and water relations in maize under drought stress at tasselling. *New Phytologist*, 129(4), 643-650.

Takanari Y., Keniche M. & Yoshikazu S. (2005). Rapid and simultaneous approximations of photosynthetic photon flux density and net photosynthetic rate in a cherry tree canopy by thermal imaging. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 74(2), 101-108. by thermal imaging.

Undurraga, P., y Vargas, S. (eds.) 2013. Manual del arándano. Boletín INIA N° 263. 120 p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA, Centro Regional de Investigación Quilamapu, Chillán, Chile.

U.S. Geological Survey (2020):

- Landsat Missions - Landsat 8 [en línea] <<https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-8>> [consulta: el 18 Marzo 2019 y 22 Marzo 2020]
- EARTH EXPLORER [en línea] <<https://earthexplorer.usgs.gov/>> [consulta: Abril- Mayo 2019]

Wang, W. N., Tarafdar, J. C., & Biswas, P. (2013). Nanoparticle synthesis and delivery by an aerosol route for watermelon plant foliar uptake. *Journal of nanoparticle research*, 15(1), 1417.

Weaver, J. E., & Bruner, W. E. (1927). Root development of vegetable crops McGraw-Hill Book Company (No. SB321 W4).

- Williamson, J. G., Coston, D. C., & Cornell, J. A. (1992). Root restriction affects shoot development of peach in a high-density orchard. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117(3), 362-367.
- Yang, X., Ren, L., Liu, Y., Jiao, D., & Jiang, S. (2014). Hydrological response to land use and land cover changes in a sub-watershed of West Liaohe River Basin, China. *Journal of Arid Land*, 6(6), 678-689.
- Zhang, J., Huang, W., Zhang, F., & Zhang, L. (2009). Root distributions in tillage layers and yields of pumpkin and oil sunflower in an intercropping system. *Frontiers of Agriculture in China*, 3(4), 388-396.
- Zhang, W., Ahanbieke, P., Wang, B. J., Gan, Y. W., Li, L. H., Christie, P., & Li, L. (2015). Temporal and spatial distribution of roots as affected by interspecific interactions in a young walnut/wheat alley cropping system in northwest China. *Agroforestry Systems*, 89(2), 327-343.
- Zhao, Y., Feng, D., Yu, L., Wang, X., Chen, Y., Bai, Y., ... & Radke, J. D. (2016). Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data. *Remote Sensing of Environment*, 183, 170-185.
- Zhou, Q., Wang, Y., & Sun, S. (2011). Distribution characteristic and growing dynamic of grape vine roots under alternate partial root zone drip irrigation. *Nongye Jixie Xuebao= Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 42(9), 59-58.

ANEXOS

Anexo A

A.1 Albedo mensual del set de 40 cultivos.

Cultivo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Tomate Industrial	0,176	0,172	0,154	0,119	0,091	0,088	0,098	0,108	0,118	0,128	0,139	0,155
Zapallo de guarda	0,182	0,172	0,155	0,127	0,104	0,100	0,107	0,115	0,122	0,134	0,149	0,165
Cebolla de guarda	0,163	0,165	0,151	0,122	0,098	0,090	0,097	0,104	0,112	0,122	0,136	0,148
Melón	0,176	0,157	0,142	0,120	0,102	0,098	0,106	0,114	0,122	0,134	0,149	0,163
Choclo	0,166	0,155	0,147	0,130	0,112	0,097	0,105	0,113	0,121	0,133	0,148	0,159
Papa	0,173	0,162	0,154	0,141	0,126	0,105	0,116	0,128	0,139	0,154	0,172	0,172
Tomate consumo fresco	0,167	0,159	0,151	0,135	0,123	0,122	0,125	0,129	0,132	0,140	0,151	0,157
Sandía	0,186	0,165	0,152	0,130	0,112	0,105	0,114	0,123	0,133	0,144	0,159	0,175
Ajo	0,154	0,134	0,118	0,101	0,088	0,092	0,103	0,114	0,126	0,135	0,143	0,151
Poroto Granado	0,158	0,157	0,145	0,123	0,105	0,101	0,108	0,116	0,123	0,133	0,144	0,152
Alcachofa	0,163	0,159	0,150	0,137	0,127	0,127	0,138	0,150	0,162	0,165	0,162	0,159
Repollo	0,159	0,149	0,146	0,131	0,120	0,123	0,125	0,127	0,129	0,136	0,147	0,149
Cebolla Intermedia	0,165	0,164	0,153	0,125	0,099	0,079	0,090	0,100	0,111	0,125	0,142	0,154
Cebolla Temprana	0,147	0,139	0,127	0,103	0,088	0,104	0,107	0,109	0,112	0,122	0,137	0,141
Haba	0,161	0,154	0,151	0,134	0,115	0,096	0,106	0,115	0,125	0,131	0,134	0,148
Frutilla	0,174	0,163	0,159	0,143	0,129	0,123	0,129	0,136	0,143	0,152	0,164	0,167
Zapallo italiano	0,168	0,151	0,141	0,127	0,116	0,116	0,122	0,128	0,134	0,144	0,158	0,162
AjÍ	0,173	0,168	0,161	0,143	0,121	0,084	0,095	0,107	0,118	0,126	0,132	0,151
Pimiento	0,179	0,171	0,163	0,144	0,127	0,116	0,121	0,126	0,131	0,134	0,135	0,153
Lechuga	0,163	0,152	0,143	0,128	0,115	0,112	0,118	0,123	0,129	0,138	0,150	0,156
Cerezo	0,162	0,152	0,152	0,135	0,130	0,105	0,109	0,117	0,131	0,144	0,155	0,159
Vid de mesa	0,199	0,189	0,188	0,170	0,153	0,122	0,117	0,118	0,127	0,138	0,162	0,194
Ciruelo europeo	0,146	0,139	0,139	0,129	0,123	0,089	0,096	0,106	0,121	0,137	0,146	0,145
Nogal	0,154	0,147	0,147	0,133	0,125	0,110	0,118	0,128	0,134	0,144	0,156	0,152
Manzano rojo	0,156	0,141	0,140	0,129	0,125	0,116	0,117	0,121	0,133	0,147	0,157	0,154
Olivo	0,139	0,137	0,138	0,120	0,110	0,093	0,098	0,102	0,112	0,123	0,135	0,140

Cultivo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Peral	0,153	0,144	0,143	0,130	0,121	0,110	0,112	0,118	0,128	0,141	0,151	0,152
Duraznero tipo conservero	0,156	0,148	0,148	0,136	0,133	0,105	0,106	0,113	0,123	0,134	0,149	0,154
Nectarino	0,158	0,149	0,149	0,135	0,133	0,110	0,109	0,113	0,124	0,136	0,152	0,157
Kiwi	0,205	0,197	0,197	0,170	0,147	0,123	0,119	0,120	0,133	0,148	0,178	0,194
Almendro	0,145	0,139	0,139	0,133	0,121	0,097	0,101	0,108	0,123	0,133	0,142	0,140
Ciruelo Japonés	0,156	0,146	0,145	0,133	0,128	0,110	0,107	0,109	0,125	0,140	0,152	0,154
Manzano verde	0,155	0,141	0,140	0,128	0,124	0,116	0,115	0,120	0,133	0,148	0,158	0,155
Naranja	0,161	0,149	0,149	0,130	0,123	0,123	0,119	0,120	0,130	0,142	0,161	0,165
Palto	0,164	0,155	0,154	0,138	0,130	0,129	0,127	0,124	0,128	0,137	0,157	0,171
Mandarino	0,166	0,156	0,155	0,137	0,131	0,124	0,121	0,127	0,137	0,149	0,164	0,167
Arándano americano	0,170	0,164	0,165	0,143	0,134	0,106	0,114	0,124	0,140	0,150	0,164	0,171
Duraznero consumo fresco	0,156	0,148	0,148	0,135	0,133	0,112	0,108	0,111	0,121	0,134	0,151	0,156
Pluots	0,157	0,147	0,146	0,132	0,128	0,109	0,106	0,109	0,126	0,140	0,153	0,154
Limonero	0,172	0,162	0,162	0,142	0,136	0,121	0,122	0,131	0,140	0,150	0,167	0,175

A.2 LAI mensual del set de 40 cultivos.

Cultivo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Tomate Industrial	2,654	2,465	1,911	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	1,261	2,053
Zapallo de guarda	2,480	2,272	2,016	1,731	1,531	0,030	0,030	0,030	1,452	1,549	1,758	2,159
Cebolla de guarda	2,537	2,143	1,746	1,481	1,288	0,030	0,030	0,030	0,030	1,398	1,673	2,209
Melón	2,421	2,014	1,778	1,623	0,030	0,030	0,030	0,030	1,394	1,606	2,012	2,339
Choclo	2,298	1,936	1,812	1,757	0,030	0,030	0,030	0,030	1,595	1,898	2,408	2,446
Papa	2,075	1,937	1,911	1,850	1,779	0,030	0,030	1,677	1,678	1,939	2,371	2,293
Tomate consumo fresco	2,124	2,110	2,031	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	1,924	2,117
Sandía	2,489	2,119	1,912	1,787	0,030	0,030	0,030	0,030	1,322	1,502	1,879	2,357
Ajo	1,578	1,506	0,030	0,030	0,030	1,592	1,832	2,081	2,329	2,229	1,897	1,787
Poroto Granado	2,175	2,051	1,824	1,663	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	1,765	2,024	2,156
Alcachofa	1,616	1,785	1,920	2,153	2,331	2,329	2,390	2,452	2,515	2,474	2,350	1,892
Repollo	2,026	2,069	2,104	2,127	2,173	2,273	0,030	0,030	0,030	1,884	1,994	2,025

Cultivo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cebolla Intermedia	2,383	1,985	1,771	1,606	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	1,592	2,119	2,322
Cebolla Temprana	2,006	1,720	1,507	0,030	0,030	0,030	0,030	1,587	1,709	1,891	2,114	2,084
Haba	2,153	2,115	1,805	1,496	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	1,707	1,794	1,882
Frutilla	2,068	1,933	1,721	1,470	1,289	1,372	1,552	1,737	1,923	2,051	2,143	2,148
Zapallo italiano	1,944	1,789	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	1,816	2,023	2,364	2,242
Ají	2,612	2,666	2,529	2,305	1,939	0,030	0,030	0,030	1,323	1,445	1,624	2,185
Pimienta	2,291	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	1,346	1,514	1,973
Lechuga	2,070	1,922	1,915	1,907	0,030	0,030	0,030	0,030	1,805	1,901	2,092	2,172
Cerezo	2,386	2,227	2,190	2,002	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	2,178	2,475	2,492
Vid de mesa	3,054	2,977	2,966	2,637	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	2,552	3,089
Ciruelo europeo	2,595	2,485	2,477	2,035	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	2,617	2,824	2,688
Nogal	2,321	2,222	2,180	2,076	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	1,661	2,506	2,510
Manzano rojo	2,614	2,515	2,475	2,388	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	2,495	2,756	2,658
Olivo	1,729	1,749	1,756	1,611	1,537	1,510	1,795	2,090	2,265	2,536	2,420	2,078
Peral	2,587	2,497	2,461	2,350	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	2,461	2,640	2,594
Duraznero tipo conservero	2,740	2,640	2,632	2,216	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	2,120	2,504	2,683
Nectarino	2,717	2,587	2,565	2,284	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	2,184	2,568	2,744
Kiwi	3,029	2,968	2,957	2,709	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	2,367	2,945	3,075
Almendro	2,320	2,151	2,132	1,792	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	2,357	2,496	2,409
Ciruelo Japonés	2,832	2,707	2,678	2,399	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	2,441	2,714	2,789
Manzano verde	2,670	2,561	2,523	2,419	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	2,544	2,788	2,711
Naranja	2,394	2,310	2,279	2,189	2,098	2,032	2,204	2,359	2,482	2,585	2,595	2,492
Palto	2,640	2,531	2,500	2,442	2,384	2,387	2,365	2,489	2,519	2,575	2,646	2,717
Mandarino	1,955	1,898	1,864	1,884	1,903	1,858	2,051	2,219	2,231	2,186	2,173	2,045
Arándano americano	2,172	2,064	2,043	1,850	1,656	1,412	1,415	1,410	1,675	2,033	2,231	2,263
Duraznero consumo fresco	2,717	2,567	2,542	2,250	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	2,134	2,569	2,761
Pluots	2,855	2,667	2,618	2,377	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	2,363	2,695	2,809
Limonero	2,412	2,364	2,337	2,275	2,213	2,213	2,279	2,483	2,589	2,624	2,572	2,467

A.3 Rugosidad mensual del set de 40 cultivos.

Cultivo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Tomate Industrial	0,198	0,184	0,143	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,094	0,153
Zapallo de guarda	0,132	0,121	0,107	0,092	0,081	0,002	0,002	0,002	0,077	0,082	0,094	0,115
Cebolla de guarda	0,132	0,112	0,091	0,077	0,067	0,002	0,002	0,002	0,002	0,073	0,087	0,115
Melón	0,099	0,082	0,073	0,066	0,001	0,001	0,001	0,001	0,057	0,066	0,082	0,096
Choclo	0,620	0,522	0,489	0,474	0,008	0,008	0,008	0,008	0,430	0,512	0,650	0,660
Papa	0,173	0,162	0,160	0,154	0,149	0,003	0,003	0,140	0,140	0,162	0,198	0,191
Tomate consumo fresco	0,198	0,197	0,189	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,179	0,197
Sandía	0,132	0,112	0,101	0,095	0,002	0,002	0,002	0,002	0,070	0,080	0,100	0,125
Ajo	0,067	0,064	0,001	0,001	0,001	0,068	0,078	0,088	0,099	0,095	0,081	0,076
Poroto Granado	0,132	0,124	0,111	0,101	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,107	0,123	0,131
Alcachofa	0,148	0,164	0,176	0,198	0,214	0,214	0,219	0,225	0,231	0,227	0,216	0,174
Repollo	0,118	0,120	0,122	0,124	0,126	0,132	0,002	0,002	0,002	0,109	0,116	0,118
Cebolla Intermedia	0,132	0,110	0,098	0,089	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,088	0,117	0,129
Cebolla Temprana	0,125	0,107	0,094	0,002	0,002	0,002	0,002	0,099	0,107	0,118	0,132	0,130
Haba	0,264	0,259	0,221	0,183	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,209	0,220	0,231
Frutilla	0,064	0,059	0,053	0,045	0,040	0,042	0,048	0,053	0,059	0,063	0,066	0,066
Zapallo italiano	0,081	0,075	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,076	0,085	0,099	0,094
Ají	0,162	0,165	0,157	0,143	0,120	0,002	0,002	0,002	0,082	0,089	0,101	0,135
Pimiento	0,221	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,130	0,146	0,190
Lechuga	0,094	0,088	0,087	0,087	0,001	0,001	0,001	0,001	0,082	0,087	0,095	0,099
Cerezo	1,264	1,180	1,160	1,061	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	1,154	1,311	1,320
Vid de mesa	0,652	0,636	0,634	0,563	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,545	0,660
Ciruelo europeo	0,910	0,871	0,868	0,713	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,917	0,990	0,943
Nogal	1,525	1,461	1,433	1,365	0,131	0,131	0,131	0,131	0,131	1,092	1,647	1,650
Manzano rojo	1,252	1,204	1,185	1,144	0,096	0,096	0,096	0,096	0,096	1,195	1,320	1,273
Olivo	1,125	1,138	1,142	1,048	1,000	0,983	1,168	1,360	1,474	1,650	1,575	1,352
Peral	1,293	1,249	1,230	1,175	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	1,230	1,320	1,297

Cultivo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Duraznero tipo conservero	0,990	0,954	0,951	0,801	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,766	0,905	0,969
Nectarino	1,307	1,244	1,234	1,099	0,096	0,096	0,096	0,096	0,096	1,050	1,235	1,320
Kiwi	0,975	0,955	0,952	0,872	0,064	0,064	0,064	0,064	0,064	0,762	0,948	0,990
Almendro	1,534	1,422	1,410	1,185	0,132	0,132	0,132	0,132	0,132	1,558	1,650	1,593
Ciruelo Japonés	0,990	0,946	0,936	0,839	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,853	0,949	0,975
Manzano verde	1,264	1,212	1,194	1,145	0,095	0,095	0,095	0,095	0,095	1,204	1,320	1,283
Naranja	1,218	1,175	1,159	1,113	1,067	1,034	1,121	1,200	1,262	1,315	1,320	1,268
Palto	1,764	1,691	1,670	1,631	1,593	1,595	1,580	1,663	1,683	1,720	1,768	1,815
Mandarino	1,156	1,123	1,103	1,114	1,126	1,099	1,214	1,313	1,320	1,293	1,286	1,210
Arándano americano	0,634	0,602	0,596	0,539	0,483	0,412	0,413	0,411	0,489	0,593	0,651	0,660
Duraznero consumo fresco	0,974	0,920	0,911	0,807	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,765	0,921	0,990
Pluots	0,990	0,925	0,908	0,824	0,069	0,069	0,069	0,069	0,069	0,820	0,934	0,974
Limonero	1,213	1,189	1,176	1,145	1,113	1,114	1,146	1,249	1,303	1,320	1,294	1,241

A.4 Desplazamiento mensual del set de 40 cultivos.

Cultivo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Tomate Industrial	0,402	0,373	0,289	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,191	0,311
Zapallo de guarda	0,268	0,246	0,218	0,187	0,165	0,003	0,003	0,003	0,157	0,167	0,190	0,233
Cebolla de guarda	0,268	0,226	0,184	0,156	0,136	0,003	0,003	0,003	0,003	0,148	0,177	0,233
Melón	0,201	0,167	0,148	0,135	0,002	0,002	0,002	0,002	0,116	0,133	0,167	0,194
Choclo	1,259	1,061	0,993	0,962	0,016	0,016	0,016	0,016	0,874	1,040	1,319	1,340
Papa	0,352	0,328	0,324	0,314	0,302	0,005	0,005	0,284	0,284	0,329	0,402	0,389
Tomate consumo fresco	0,402	0,399	0,384	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,364	0,401
Sandía	0,268	0,228	0,206	0,192	0,003	0,003	0,003	0,003	0,142	0,162	0,202	0,254
Ajo	0,136	0,130	0,003	0,003	0,003	0,137	0,158	0,180	0,201	0,192	0,164	0,154
Poroto Granado	0,268	0,253	0,225	0,205	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,217	0,249	0,266
Alcachofa	0,301	0,333	0,358	0,401	0,435	0,434	0,446	0,457	0,469	0,461	0,438	0,353
Repollo	0,239	0,244	0,248	0,251	0,256	0,268	0,004	0,004	0,004	0,222	0,235	0,239

Cultivo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cebolla Intermedia	0,268	0,223	0,199	0,181	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,179	0,238	0,261
Cebolla Temprana	0,254	0,218	0,191	0,004	0,004	0,004	0,004	0,201	0,217	0,240	0,268	0,264
Haba	0,536	0,527	0,449	0,372	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,425	0,447	0,469
Frutilla	0,129	0,121	0,107	0,092	0,080	0,086	0,097	0,108	0,120	0,128	0,134	0,134
Zapallo italiano	0,165	0,152	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,154	0,172	0,201	0,191
Ají	0,328	0,335	0,318	0,290	0,244	0,004	0,004	0,004	0,166	0,182	0,204	0,275
Pimienta	0,448	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,263	0,296	0,386
Lechuga	0,192	0,178	0,177	0,177	0,003	0,003	0,003	0,003	0,167	0,176	0,194	0,201
Cerezo	2,567	2,395	2,356	2,153	0,215	0,215	0,215	0,215	0,215	2,342	2,662	2,680
Vid de mesa	1,325	1,291	1,286	1,144	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	1,107	1,340
Ciruelo europeo	1,847	1,769	1,763	1,448	0,142	0,142	0,142	0,142	0,142	1,862	2,010	1,914
Nogal	3,097	2,965	2,910	2,771	0,267	0,267	0,267	0,267	0,267	2,216	3,344	3,350
Manzano rojo	2,541	2,445	2,407	2,322	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	2,426	2,680	2,584
Olivo	2,284	2,311	2,319	2,128	2,030	1,995	2,372	2,762	2,993	3,350	3,197	2,745
Peral	2,626	2,535	2,498	2,385	0,203	0,203	0,203	0,203	0,203	2,498	2,680	2,634
Duraznero tipo conservero	2,010	1,937	1,931	1,626	0,147	0,147	0,147	0,147	0,147	1,555	1,837	1,968
Nectarino	2,654	2,527	2,505	2,230	0,195	0,195	0,195	0,195	0,195	2,132	2,507	2,680
Kiwi	1,980	1,940	1,933	1,771	0,131	0,131	0,131	0,131	0,131	1,547	1,925	2,010
Almendro	3,114	2,888	2,862	2,405	0,268	0,268	0,268	0,268	0,268	3,163	3,350	3,234
Ciruelo Japonés	2,010	1,921	1,901	1,703	0,142	0,142	0,142	0,142	0,142	1,732	1,926	1,980
Manzano verde	2,566	2,461	2,425	2,324	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	2,445	2,680	2,606
Naranja	2,473	2,386	2,354	2,260	2,167	2,099	2,276	2,437	2,563	2,669	2,680	2,574
Palto	3,580	3,432	3,391	3,312	3,233	3,238	3,207	3,375	3,417	3,493	3,589	3,685
Mandarino	2,348	2,280	2,239	2,262	2,286	2,231	2,464	2,666	2,680	2,625	2,610	2,457
Arándano americano	1,287	1,222	1,210	1,095	0,981	0,836	0,838	0,835	0,992	1,204	1,321	1,340
Duraznero consumo fresco	1,978	1,868	1,850	1,637	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	1,553	1,870	2,010
Pluots	2,010	1,878	1,843	1,674	0,141	0,141	0,141	0,141	0,141	1,664	1,897	1,977
Limonero	2,464	2,414	2,388	2,324	2,260	2,261	2,327	2,536	2,645	2,680	2,627	2,520

A.5 Parámetros vegetación de otras clases no agrícolas derivadas de DGA (2018)

Clase	<i>Rarc</i>	<i>Rmin</i>	<i>WIND_H</i>	<i>RGL</i>	<i>Rad_atten</i>	<i>Wind_atten</i>	<i>Trunk_ratio</i>
Anuales	2	80	2,5	200	0,50	0,50	0,20
Bosque	25	200	50	200	0,50	0,47	0,20
Pastizales	2	200	3	200	0,50	0,09	0,20
Matorrales	2,5	200	5	200	0,50	0,09	0,20
Humedales	25	25	2,5	65	0,50	0,50	0,20
lake	25	25	2,5	5000	0,50	0,50	0,20
Sup_Impermeable	25	25	2,5	5000	0,50	0,50	0,20
Hielo y nieves	25	25	2,5	5000	0,5	0,5	0,2

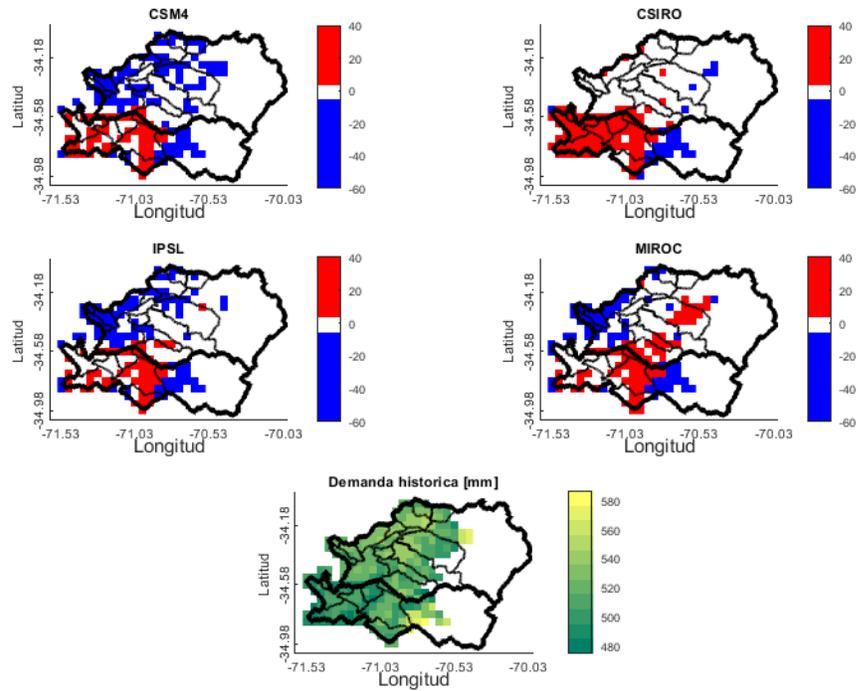
A.6 Valores empleados en el cálculo del índice DELSA para el Tomate Industrial.

Parámetro	Valor base	Valor mínimo	Valor máximo	<i>Sj</i>
<i>Rarc</i>	2	1	3	0,33
<i>Rmin</i>	150	250	300	208,33
<i>RGL</i>	200	190	210	33,33
<i>Rad_atten</i>	0,5	0	1	0,08
<i>Trunk_ratio</i>	0,1	0,05	0,5	0,02
<i>h</i>	0,6	0,4	1	0,03
<i>Root_depth</i>	0,1	0	1	0,08
<i>Root_fraction</i>	0,14	0	1	0,08

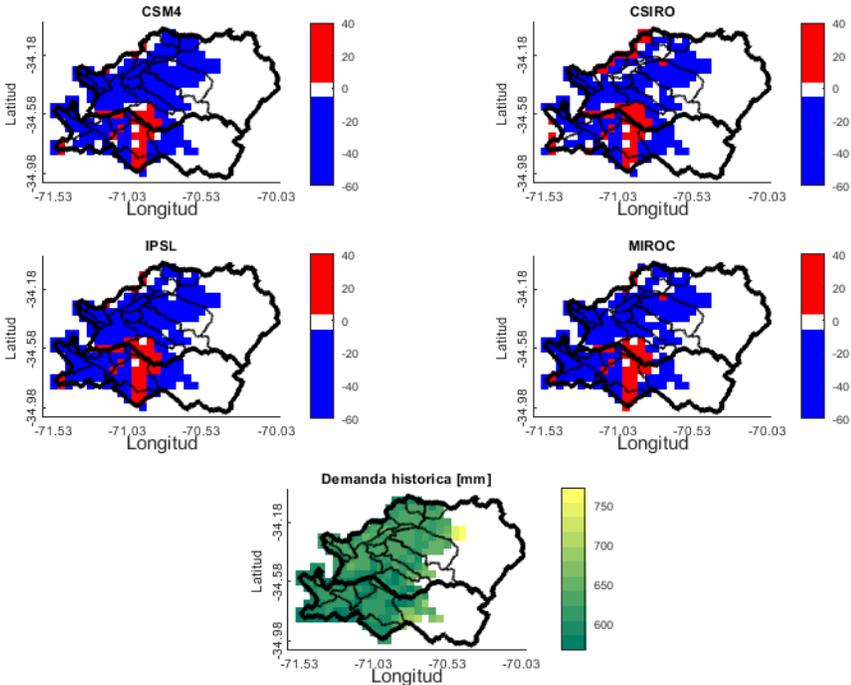
Anexo B

Gráficos de las zonas variación demanda evapotranspirativa de las 40 clases de cultivos agrícolas, comparación entre la demanda evapotranspirativa futura con respecto a la histórica, de modo de identificar por celda cuánto aumenta o disminuye dicha demanda en la situación futura (en porcentaje). Se identifica en rojo las celdas de aumento y en azul las celdas de reducción, se considera el periodo histórico (1985-2014) y el periodo futuro (2015-2059).

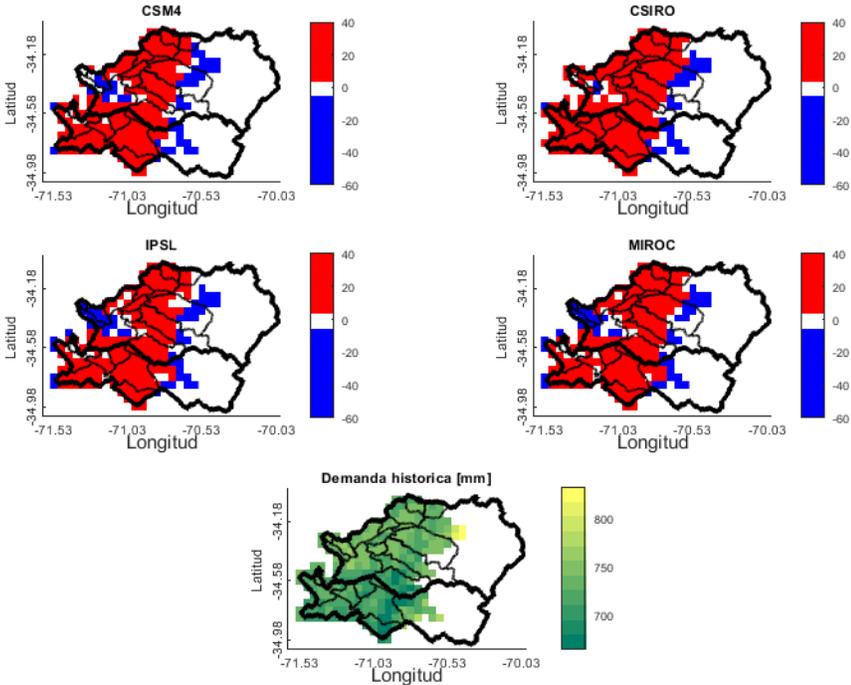
Demanda evapotranspirativa1: Tomate industrial



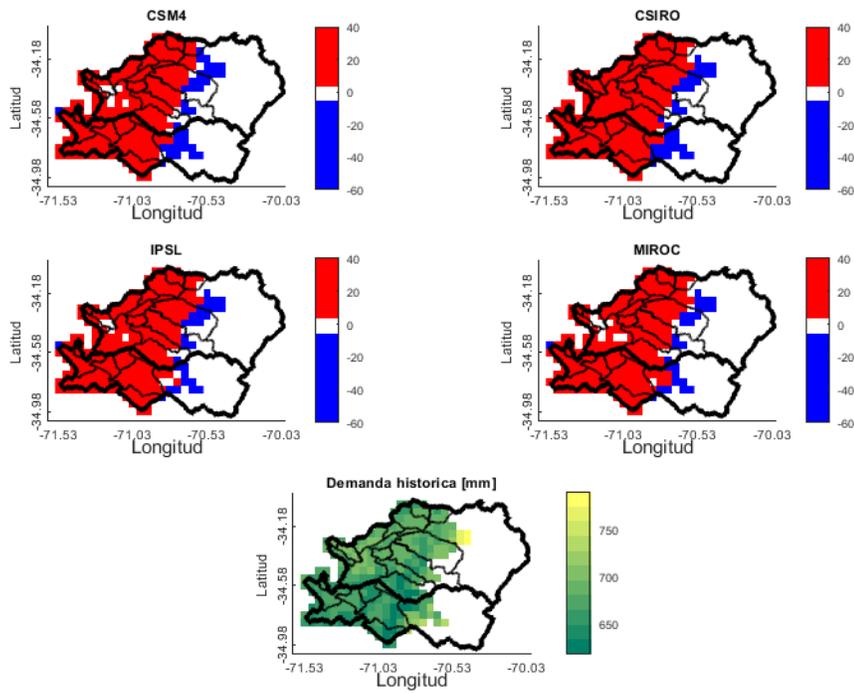
Demanda evapotranspirativa 2: Zapallo guarda



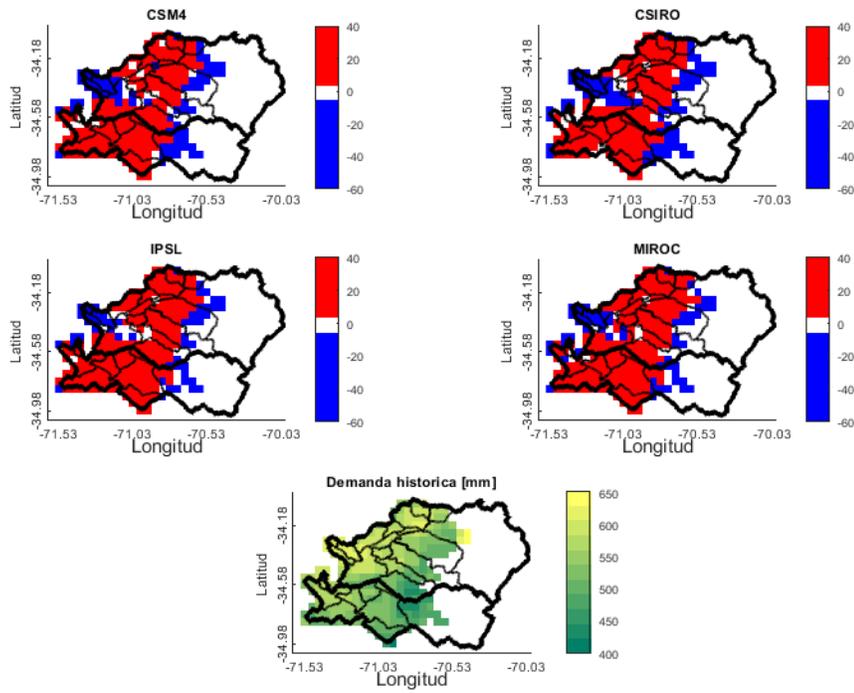
Demanda evapotranspirativa 3: Cebolla guarda



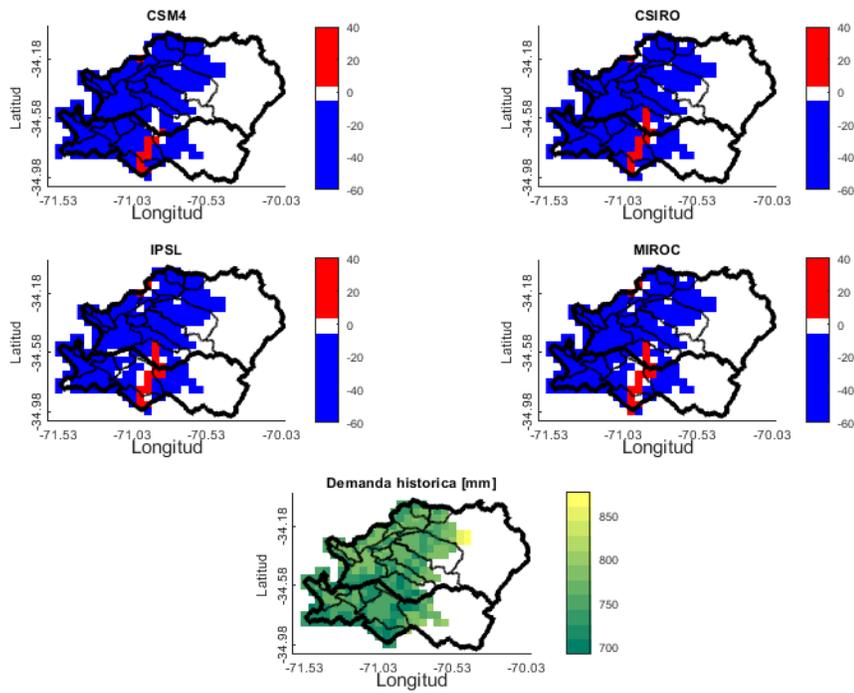
Demanda evapotranspirativa 4: Melón



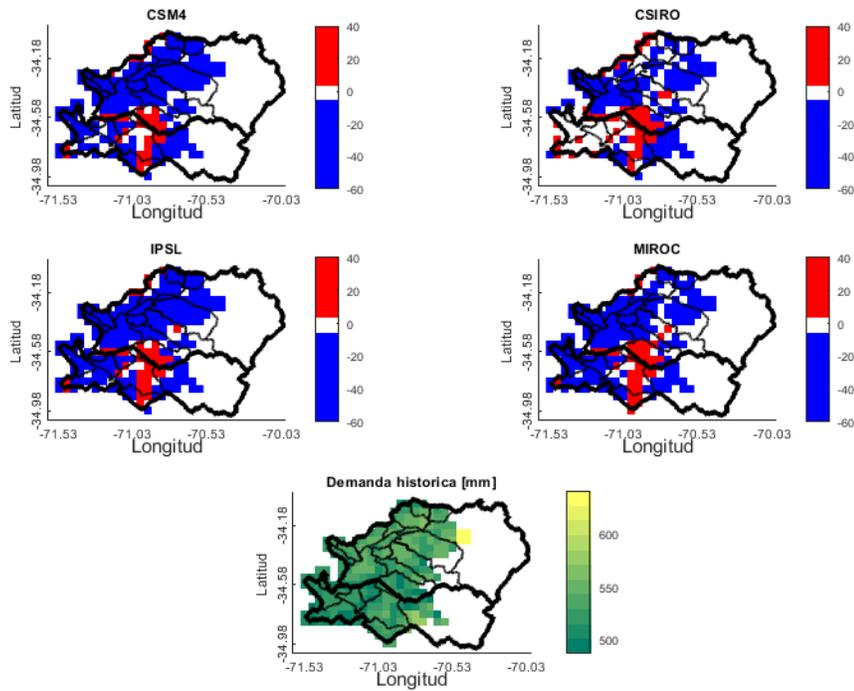
Demanda evapotranspirativa 5: Maíz



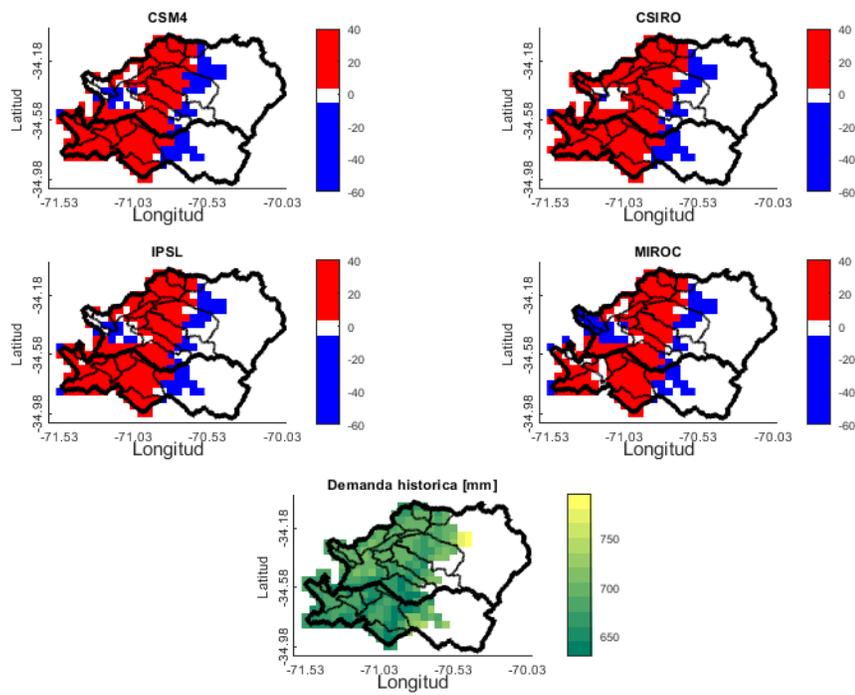
Demanda evapotranspirativa 6: Papa



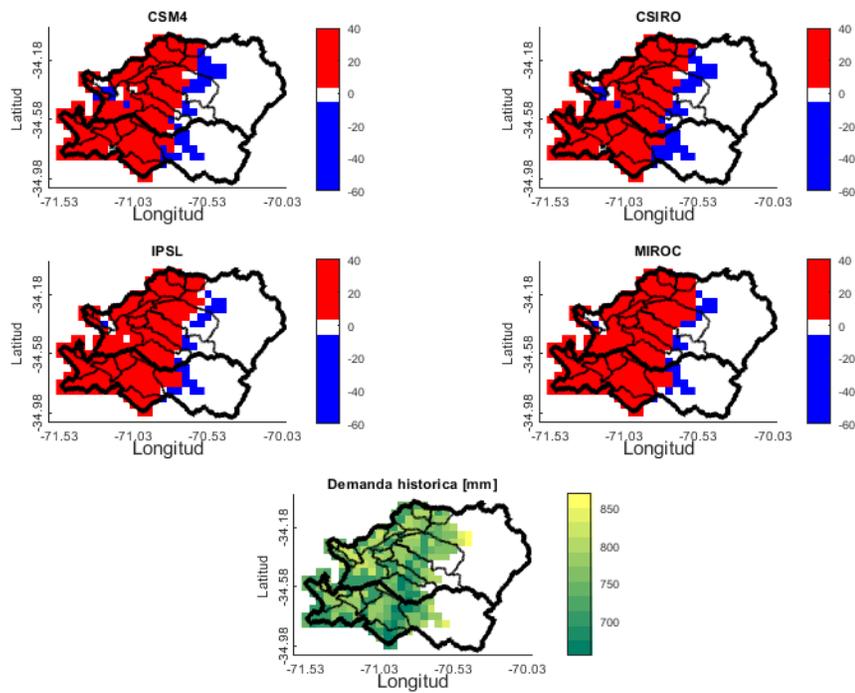
Demanda evapotranspirativa 7: Tomate fresco



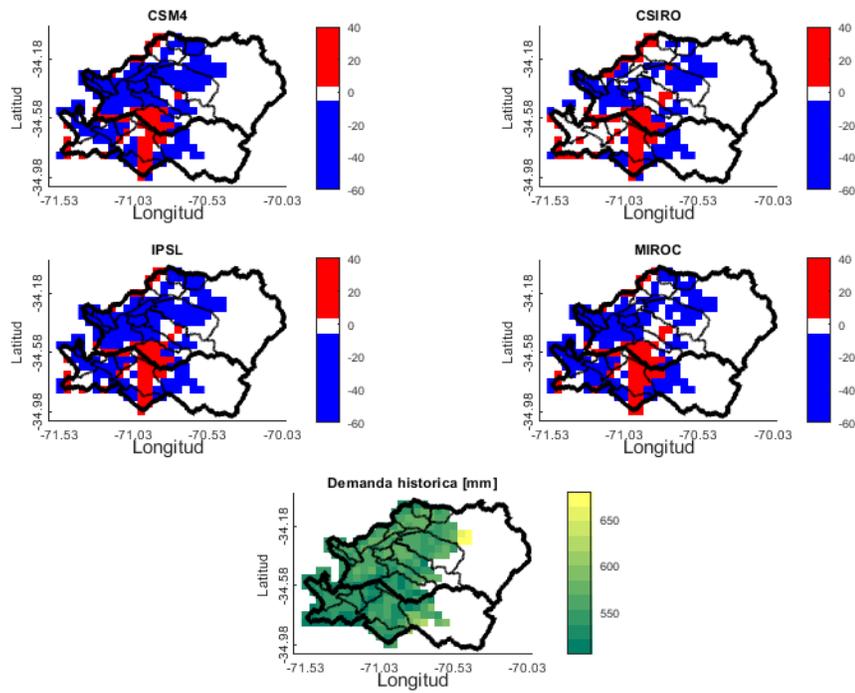
Demanda evapotranspirativa 8: Sandía



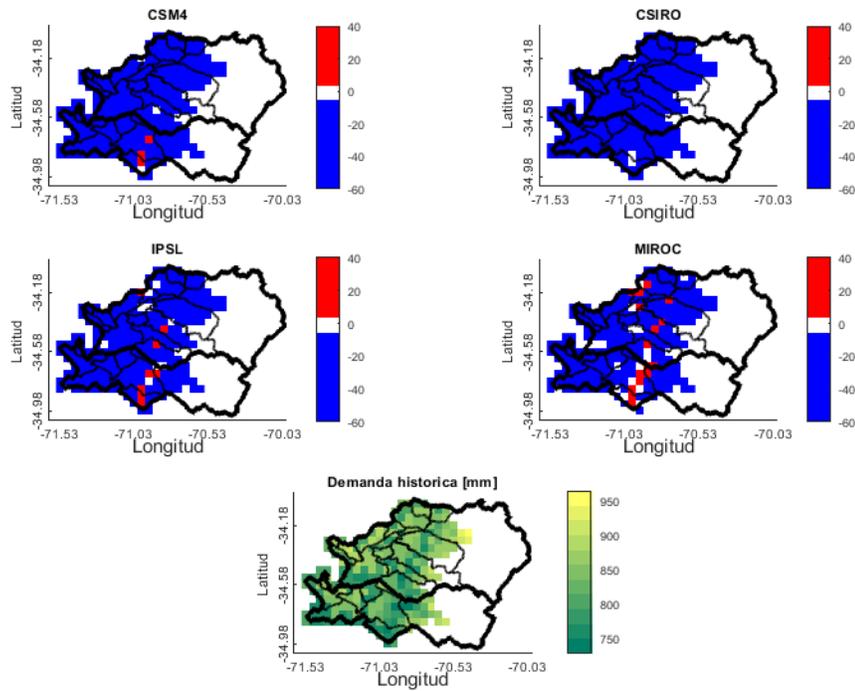
Demanda evapotranspirativa 9: Ajo



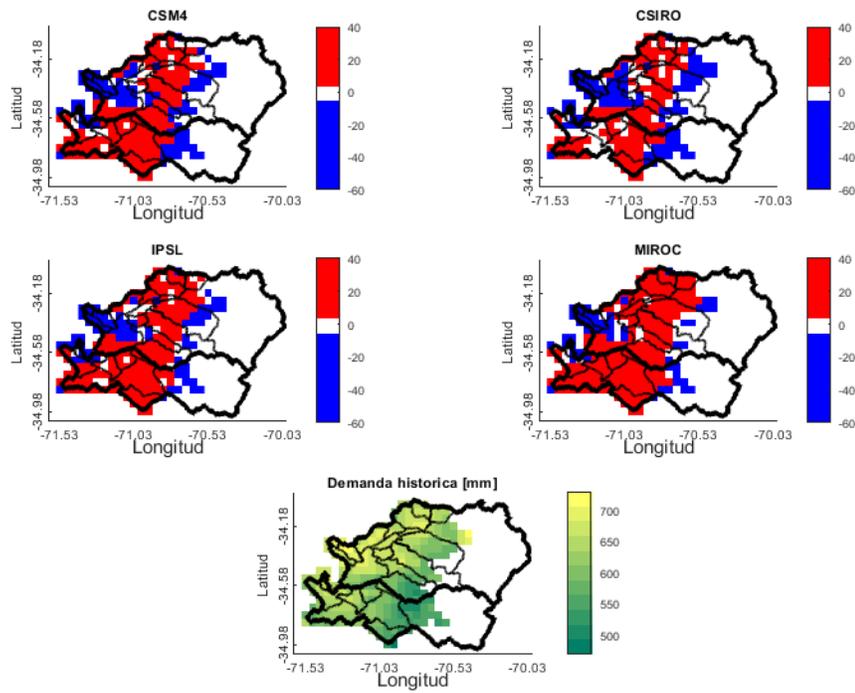
Demanda evapotranspirativa 10: Poroto granado



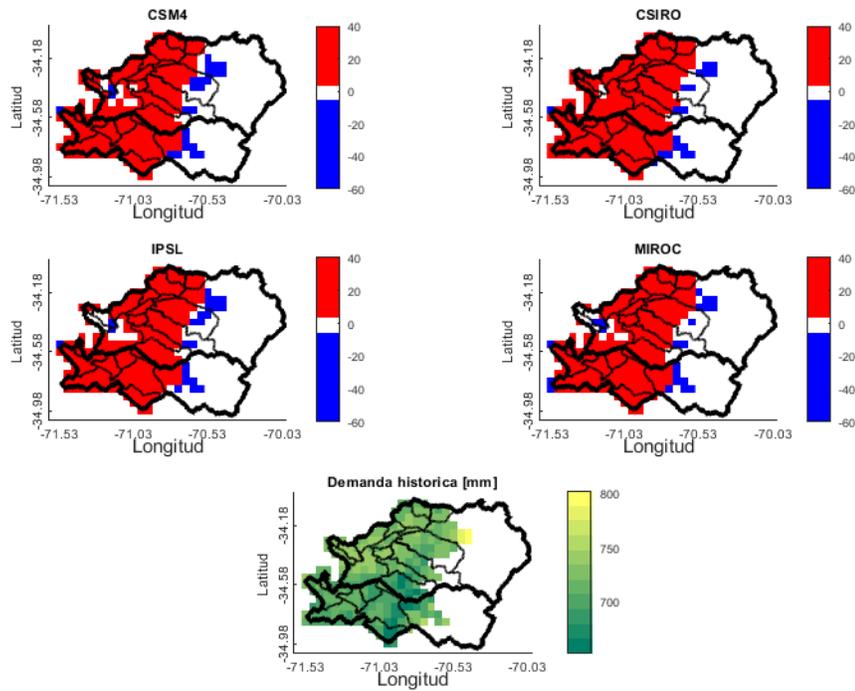
Demanda evapotranspirativa 11: Alcachofa



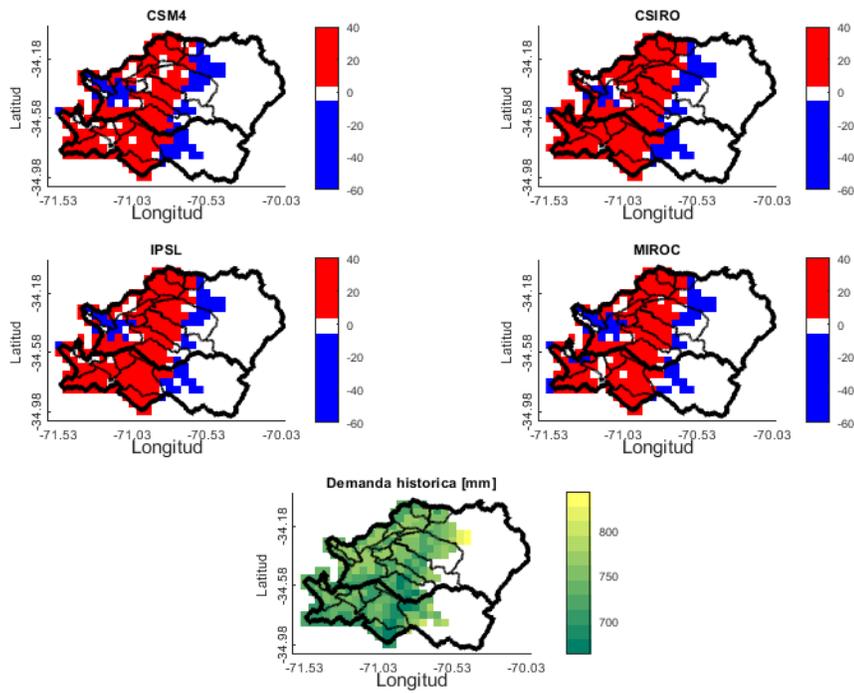
Demanda evapotranspirativa 12: Repollo



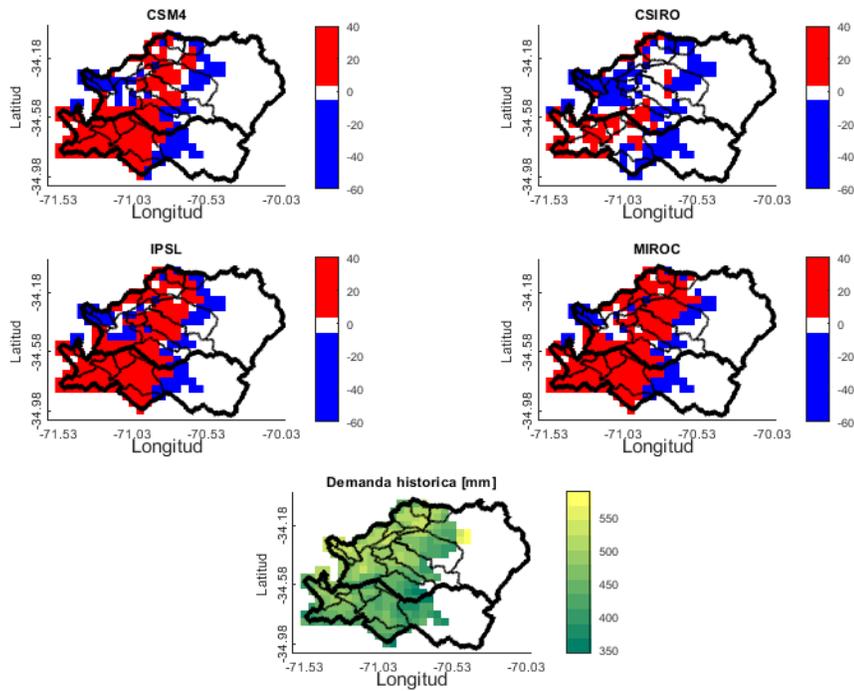
Demanda evapotranspirativa 13: Cebolla intermedia



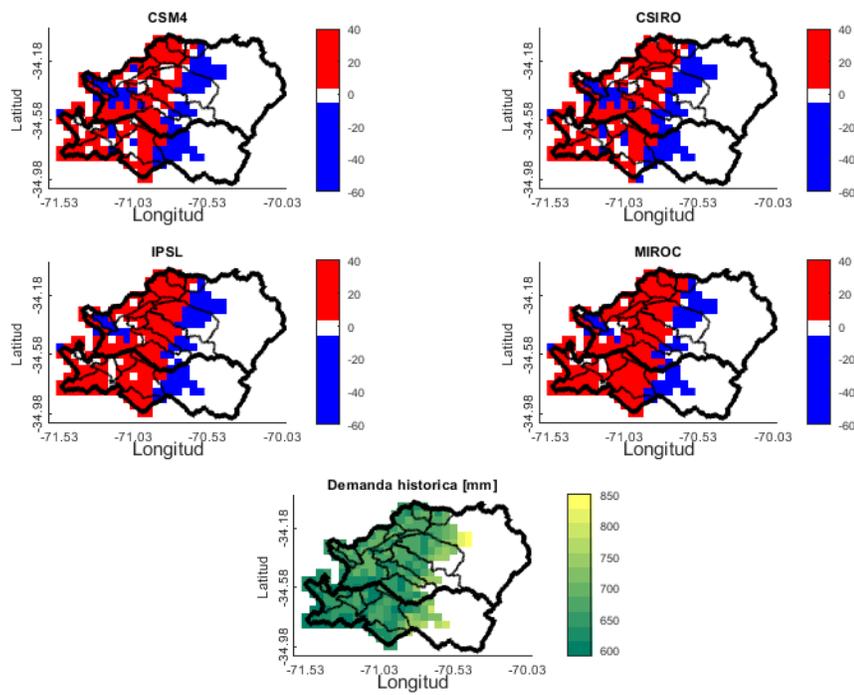
Demanda evapotranspirativa 14: Cebolla temprana



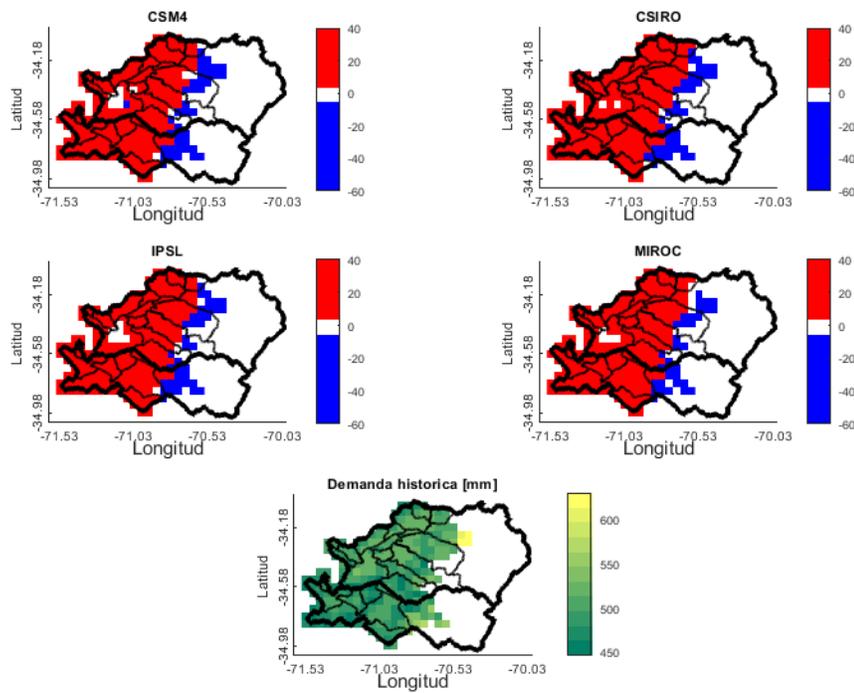
Demanda evapotranspirativa 15: Haba



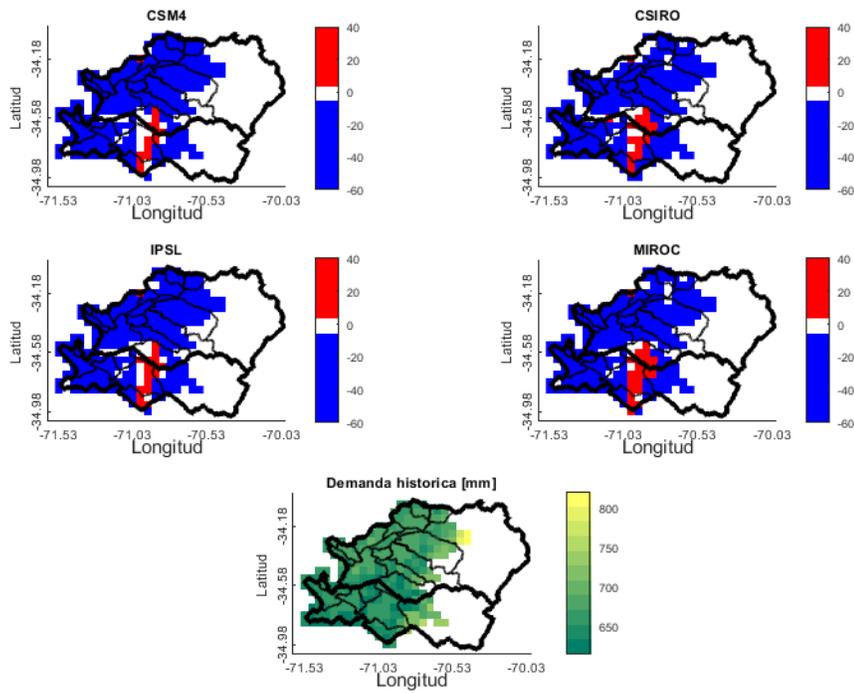
Demanda evapotranspirativa 16: Frutilla



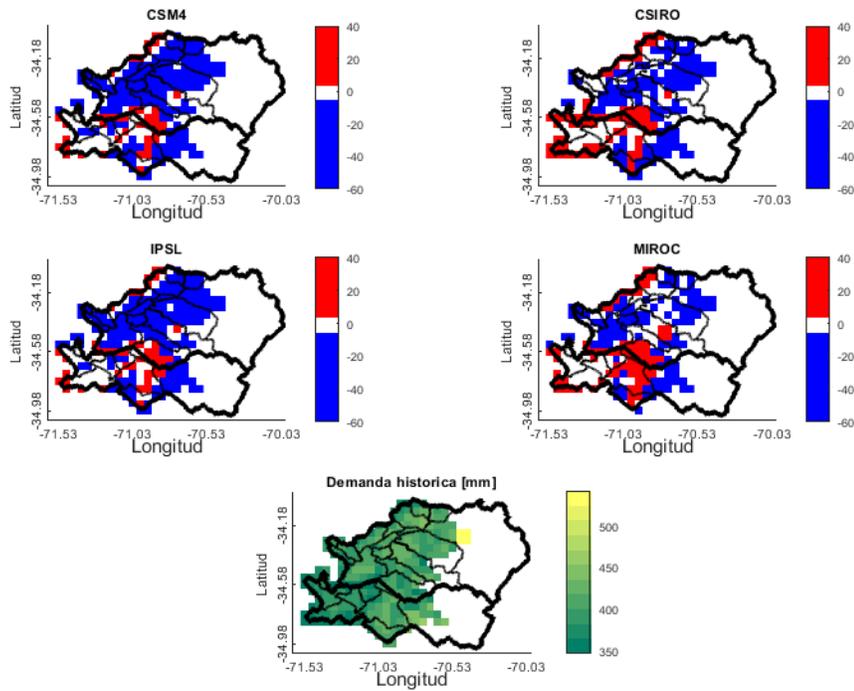
Demanda evapotranspirativa 17: Zapallo italiano



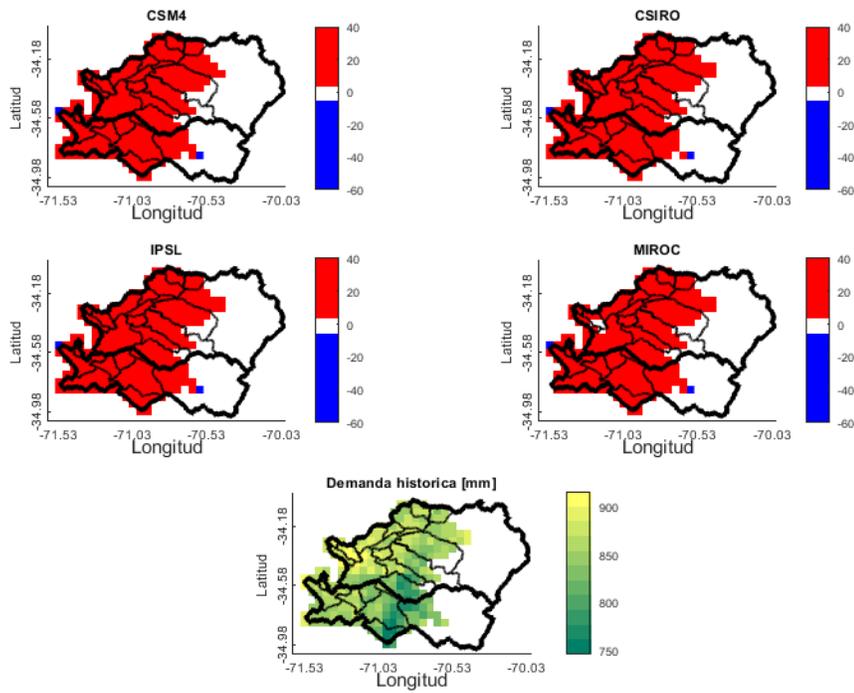
Demanda evapotranspirativa 18: Ají



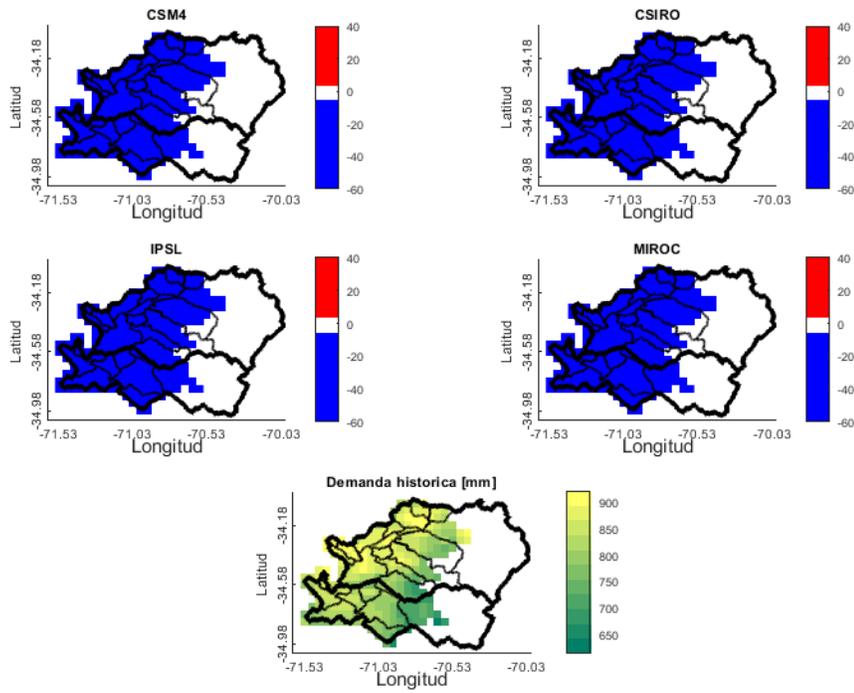
Demanda evapotranspirativa 19: Pimiento



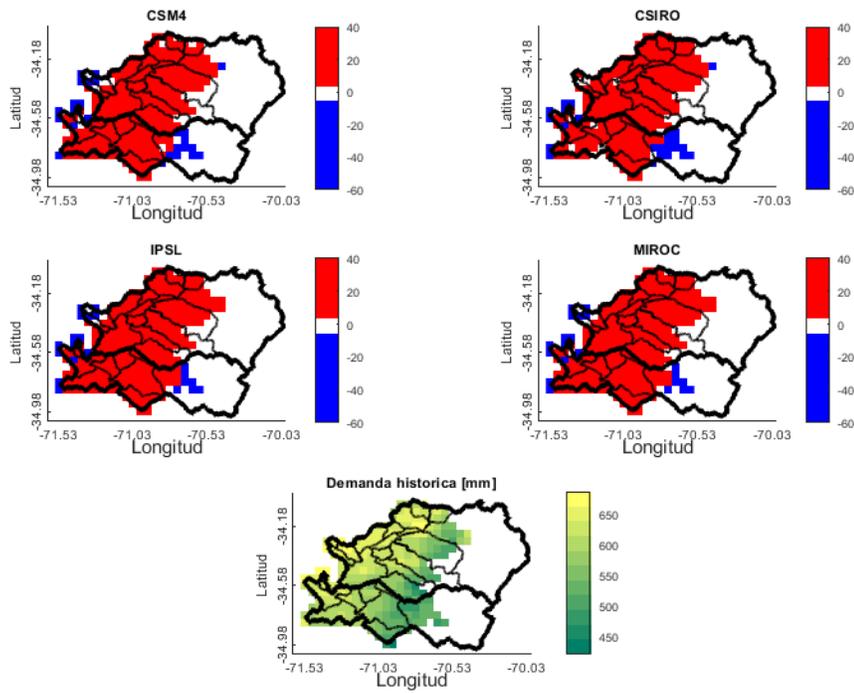
Demanda evapotranspirativa 20: Lechuga



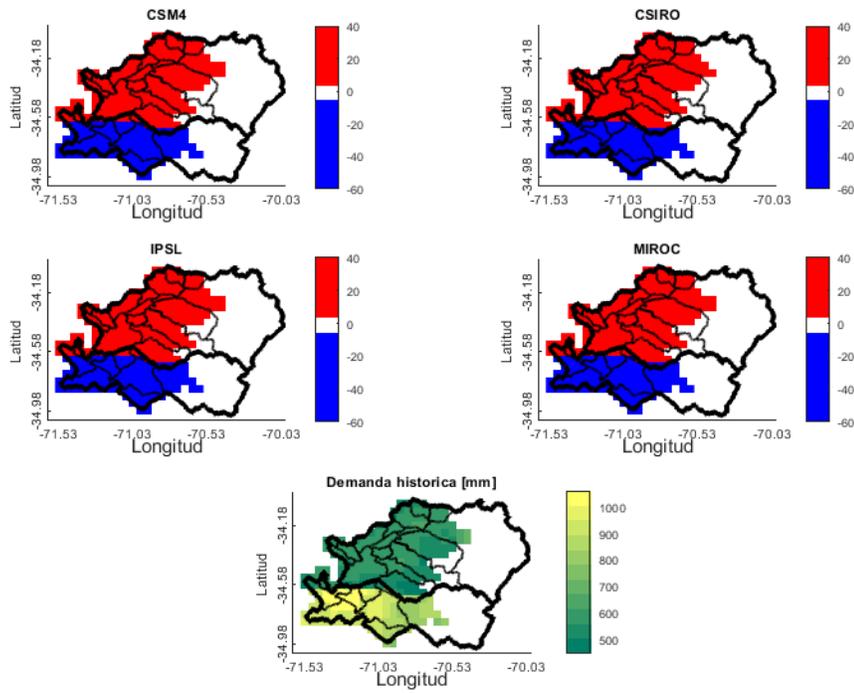
Demanda evapotranspirativa 21: Cerezo



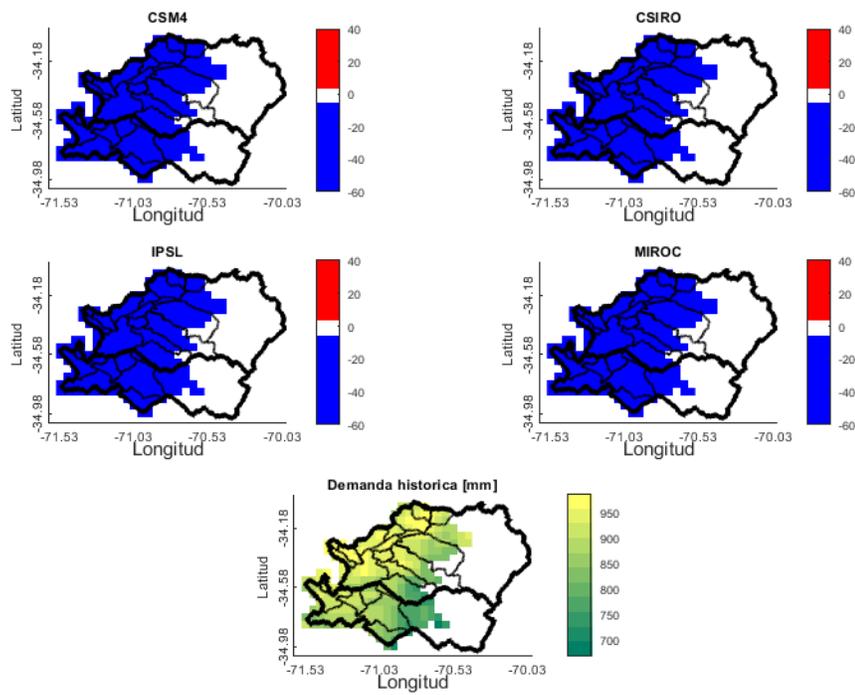
Demanda evapotranspirativa 22: Vid de mesa



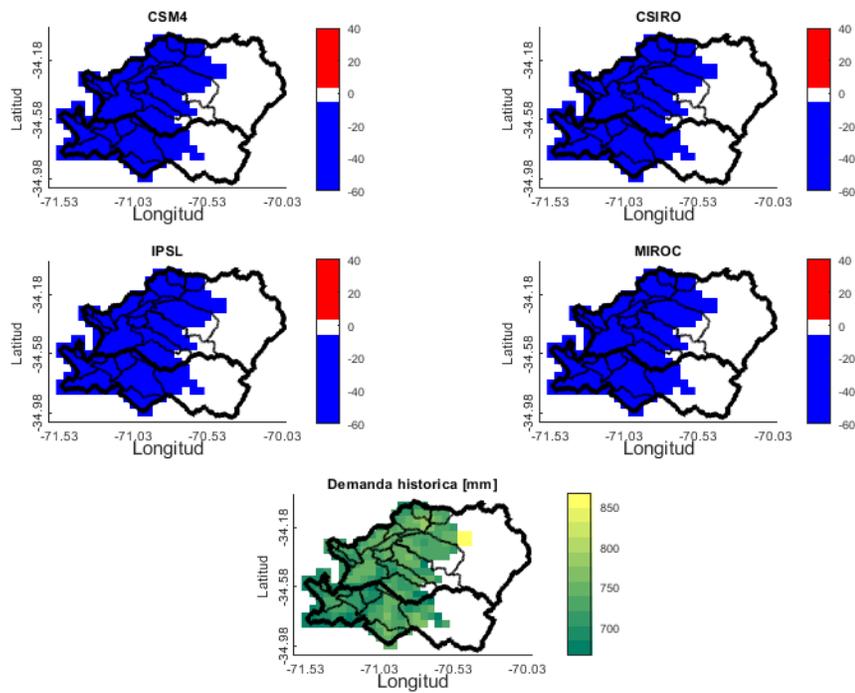
Demanda evapotranspirativa 23: Ciruelo europeo



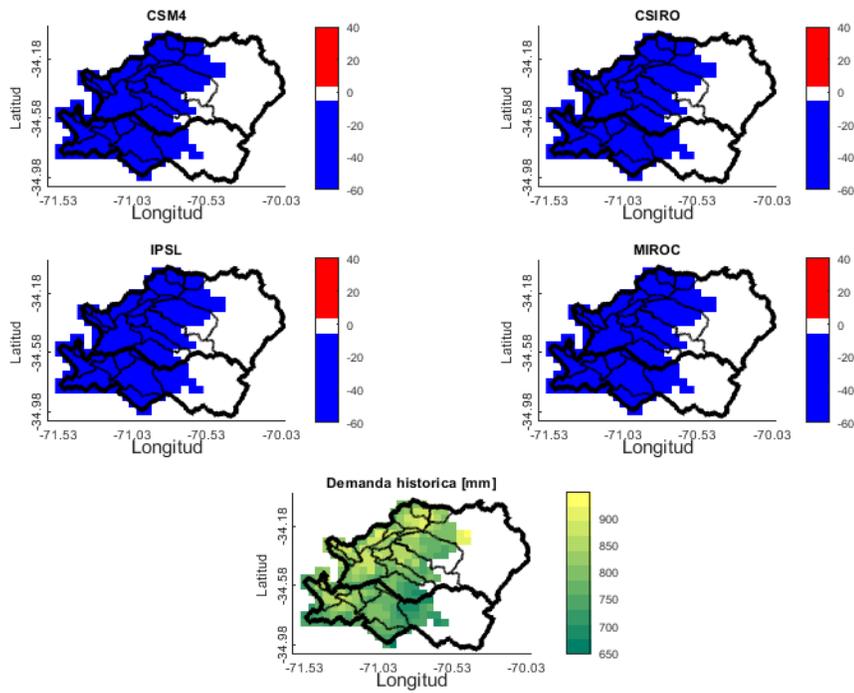
Demanda evapotranspirativa 24: Nogal



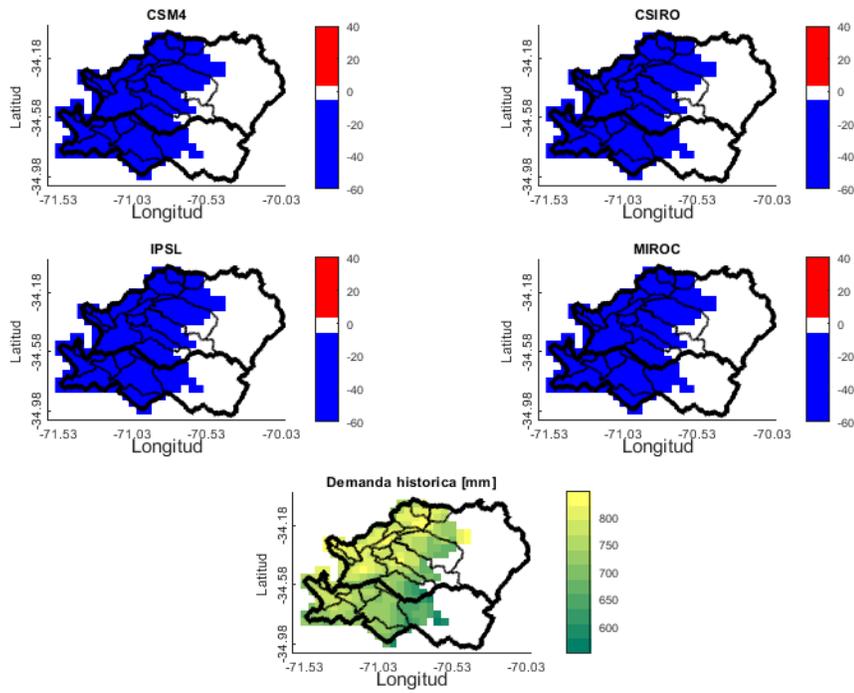
Demanda evapotranspirativa 25: Manzano rojo



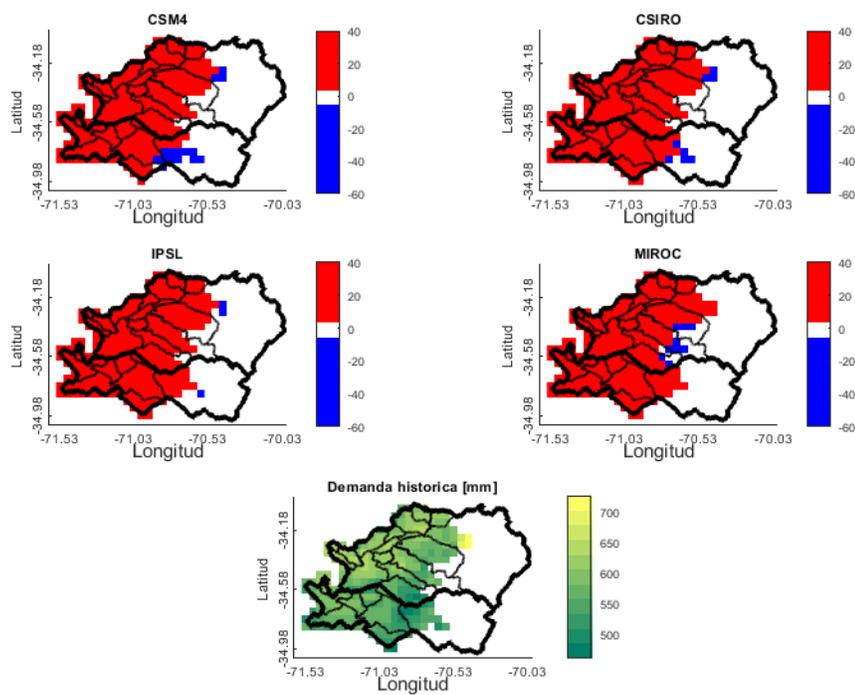
Demanda evapotranspirativa 26: Olivo



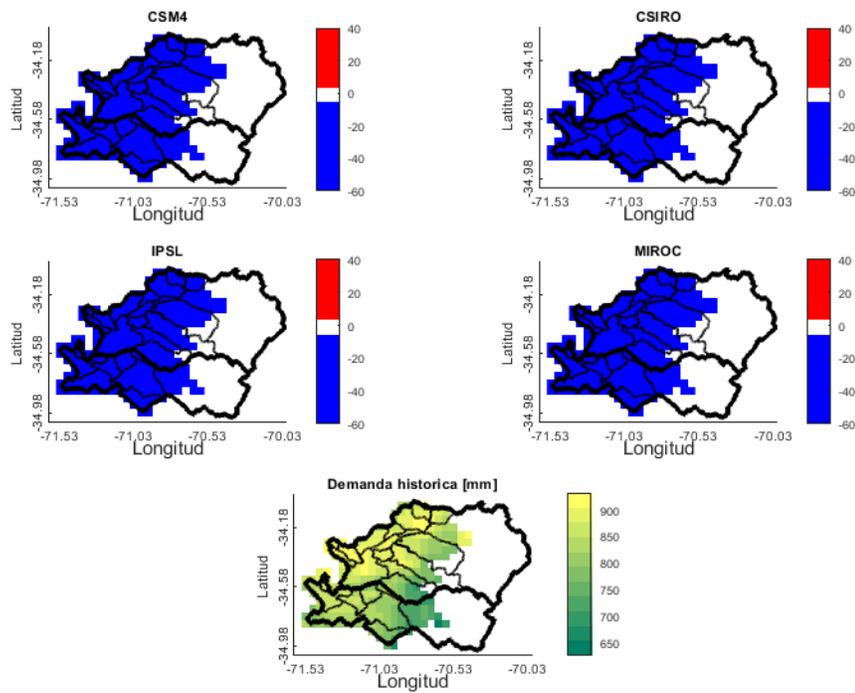
Demanda evapotranspirativa 27: Peral



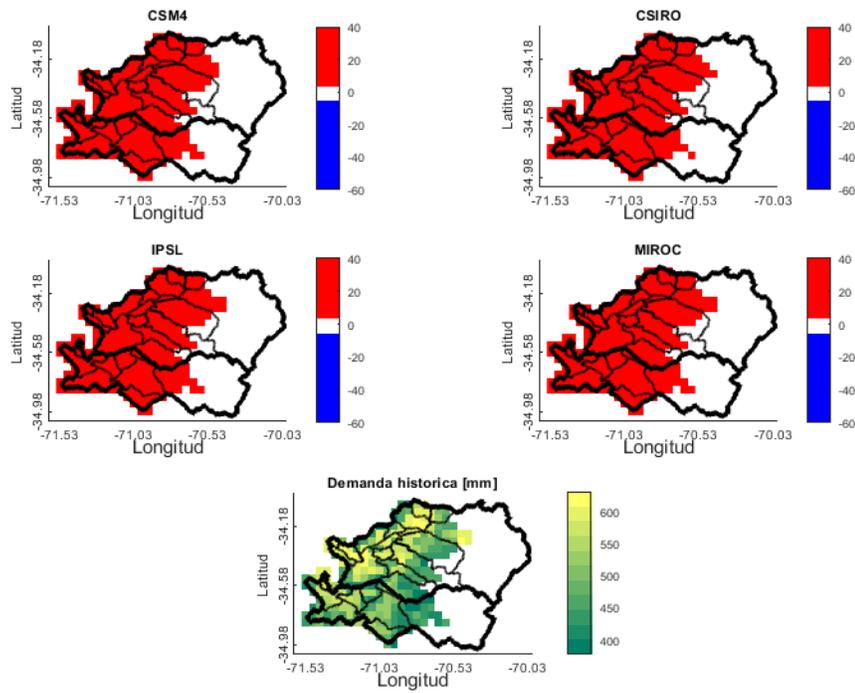
Demanda evapotranspirativa 28: Duraznero conservero



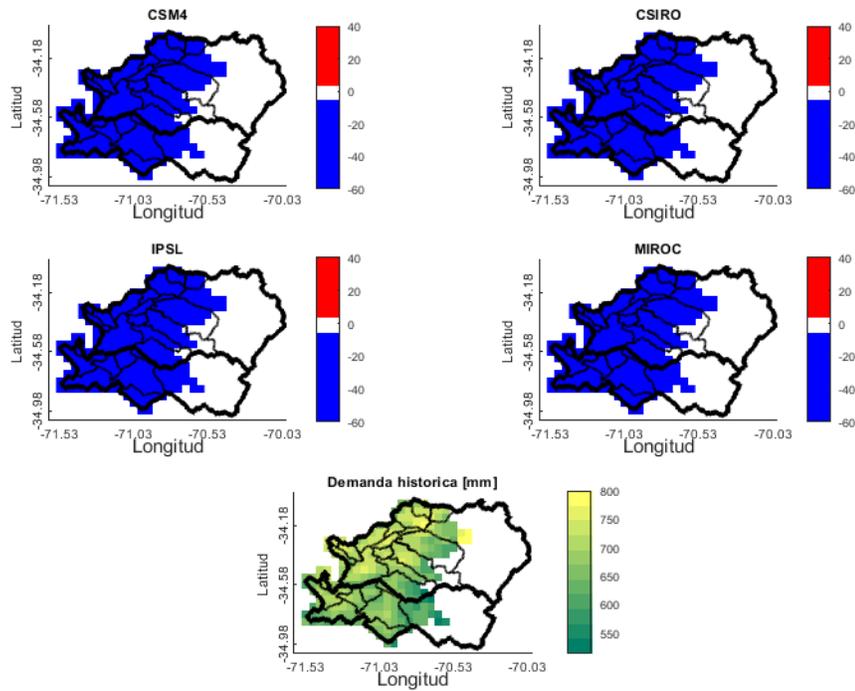
Demanda evapotranspirativa 29: Nectarino



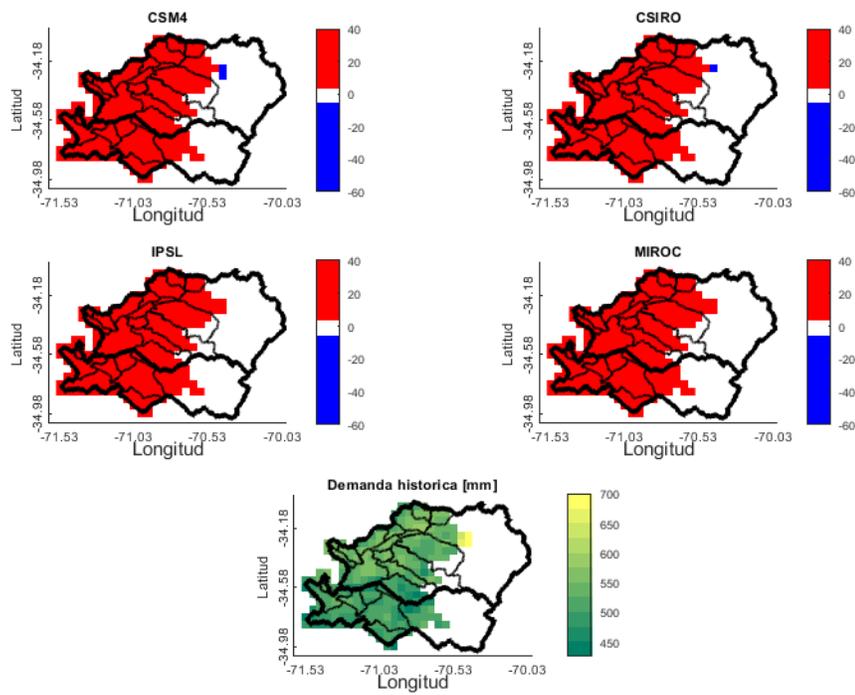
Demanda evapotranspirativa 30: Kiwi



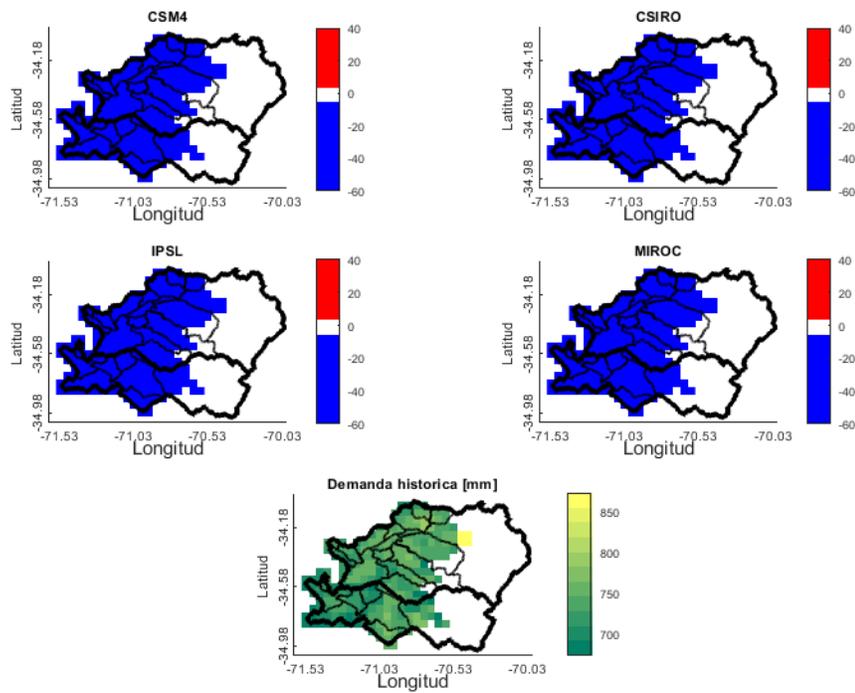
Demanda evapotranspirativa 31: Almendro



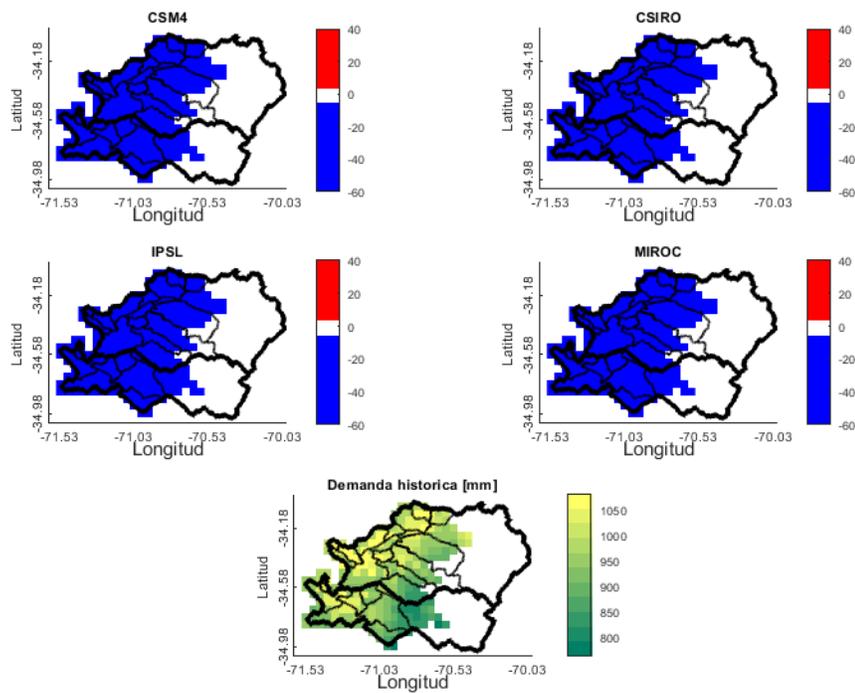
Demanda evapotranspirativa 32: Ciruelo Japonés



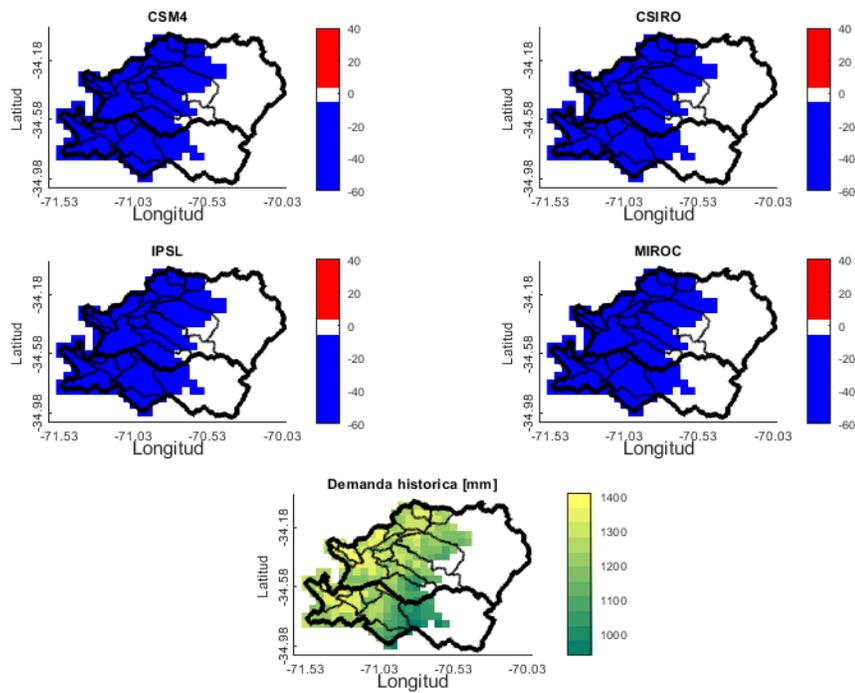
Demanda evapotranspirativa 33: Manzano verde



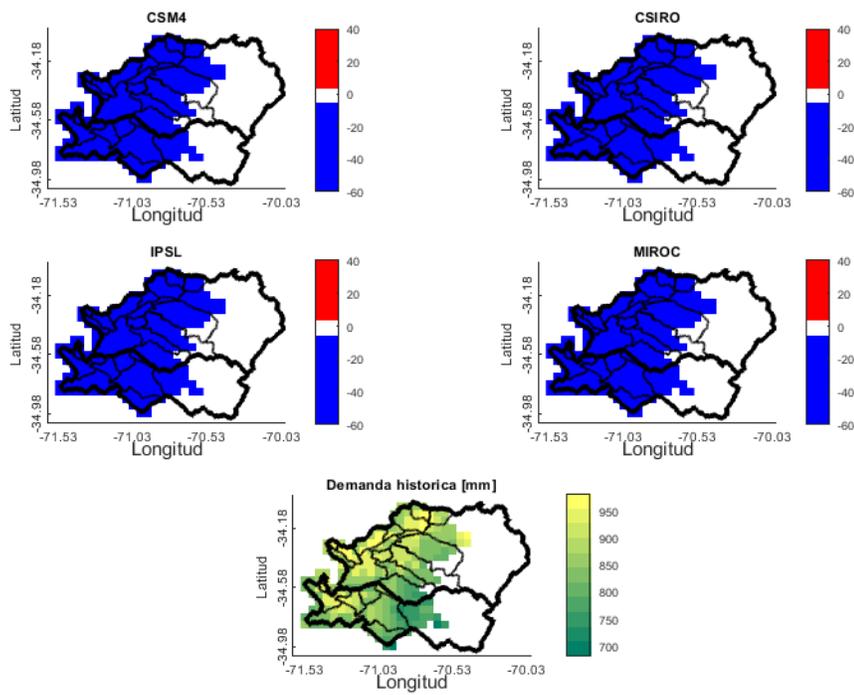
Demanda evapotranspirativa 34: Naranjo



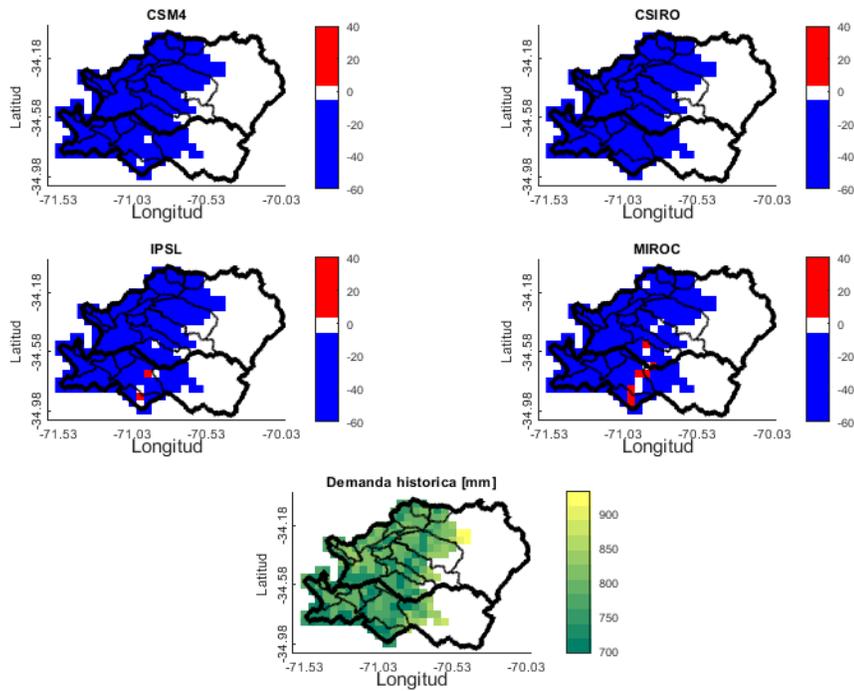
Demanda evapotranspirativa 35: Palto



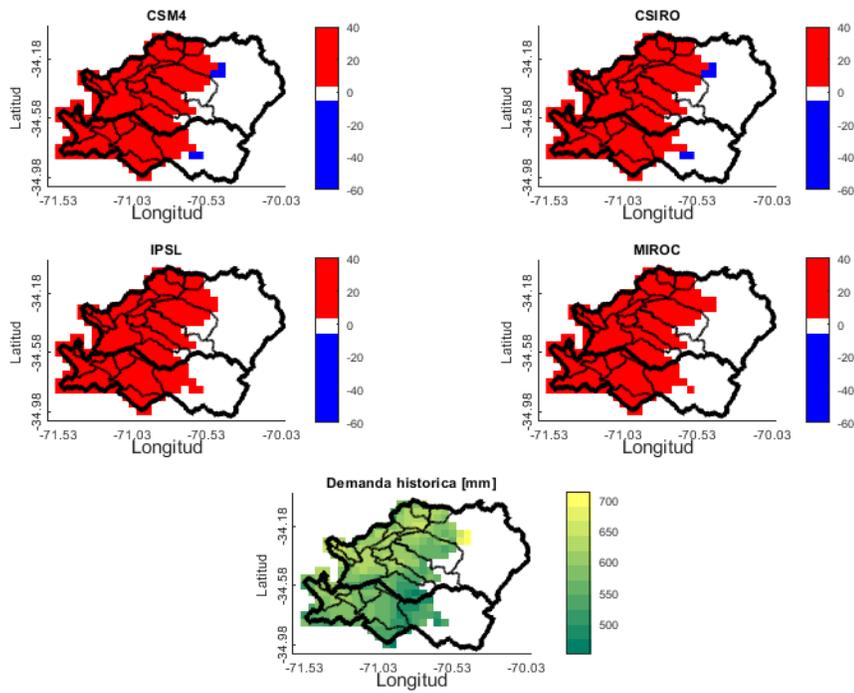
Demanda evapotranspirativa 36: Mandarino



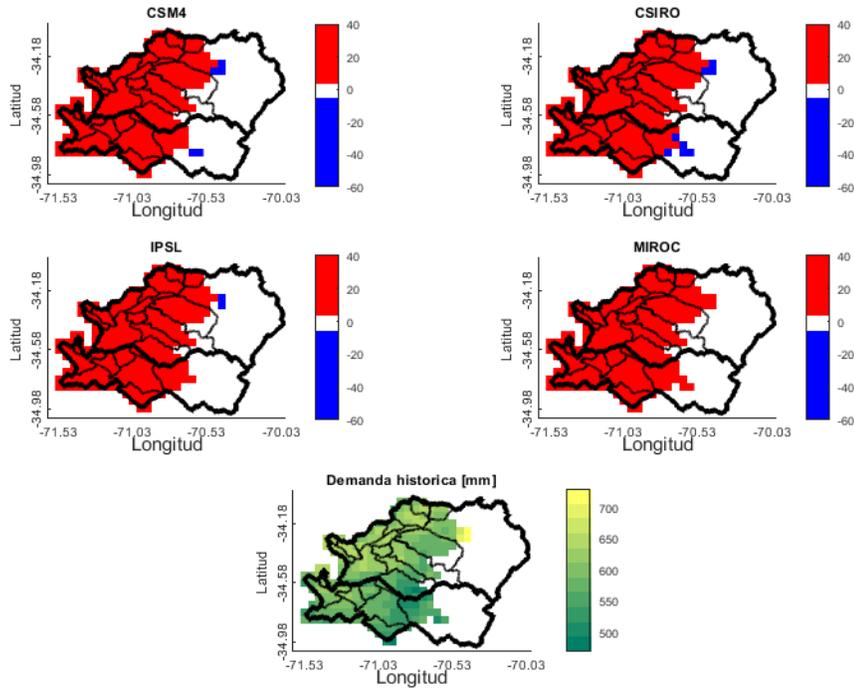
Demanda evapotranspirativa 37: Arándano americano



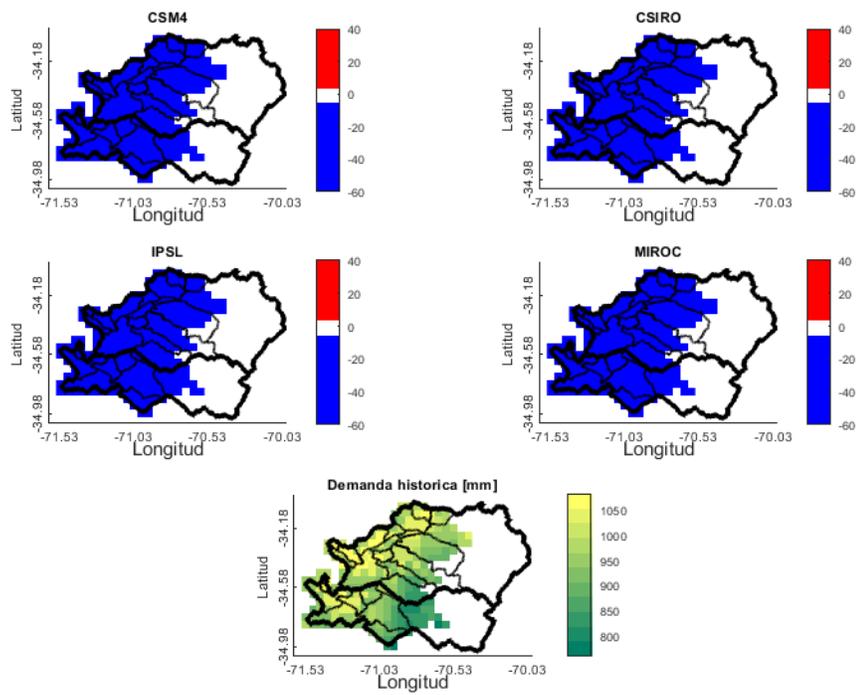
Demanda evapotranspirativa 38: Duraznero fresco



Demanda evapotranspirativa 39: Pluots



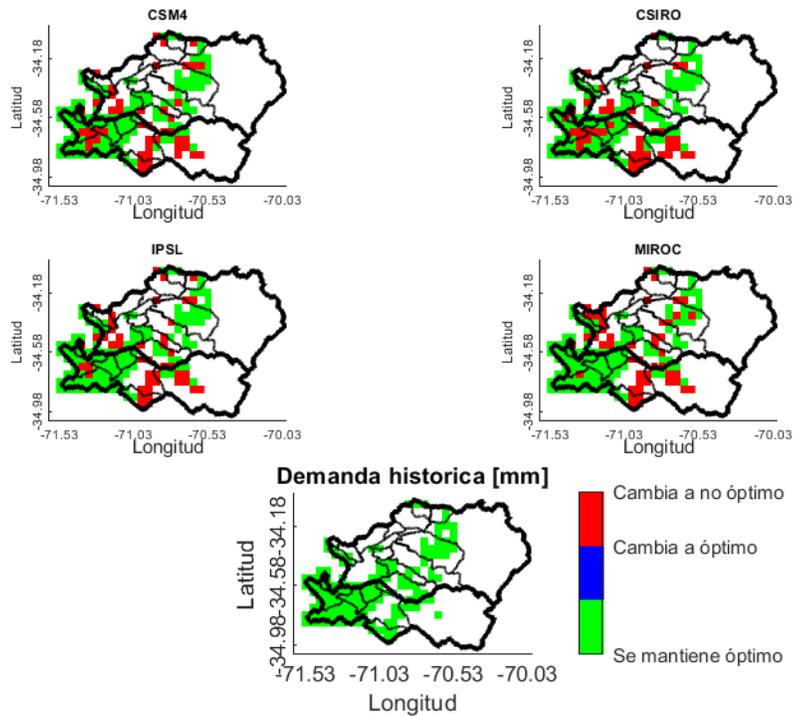
Demanda evapotranspirativa 40: Limonero



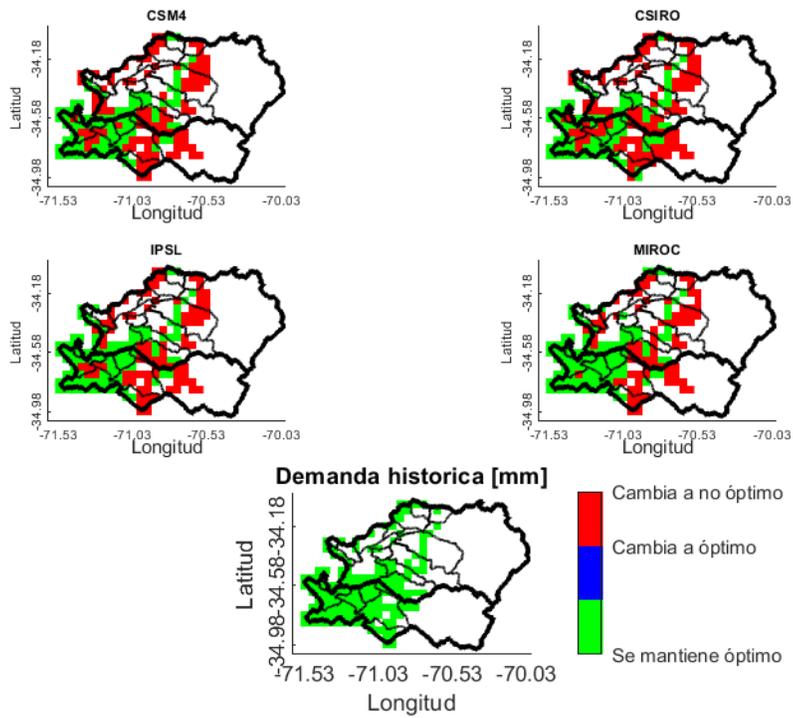
Anexo C

Gráficos de los cambios de zonas óptimas para el set de 40 clases de cultivos agrícolas. Se identifican las zonas óptimas en verde, en rojo las celdas que dejan de ser óptimas en el futuro y en azul, las que se vuelven óptimas en el futuro. Se considera el periodo histórico (1985-2014) y el periodo futuro (2015-2059), presentando un gráfico para cada GCMs.

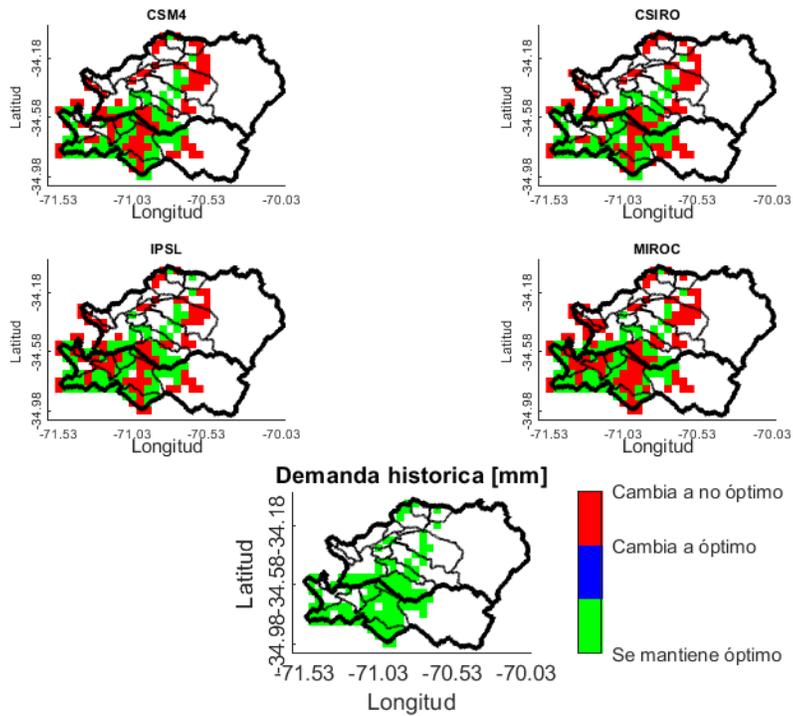
Ubicación óptima1: Tomate industrial



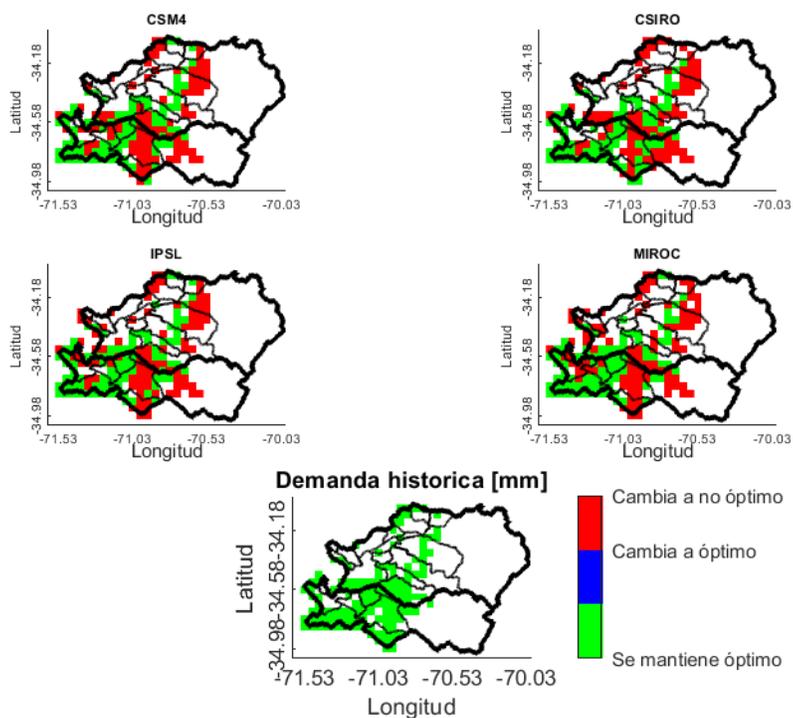
Ubicación óptima 2: Zapallo guarda



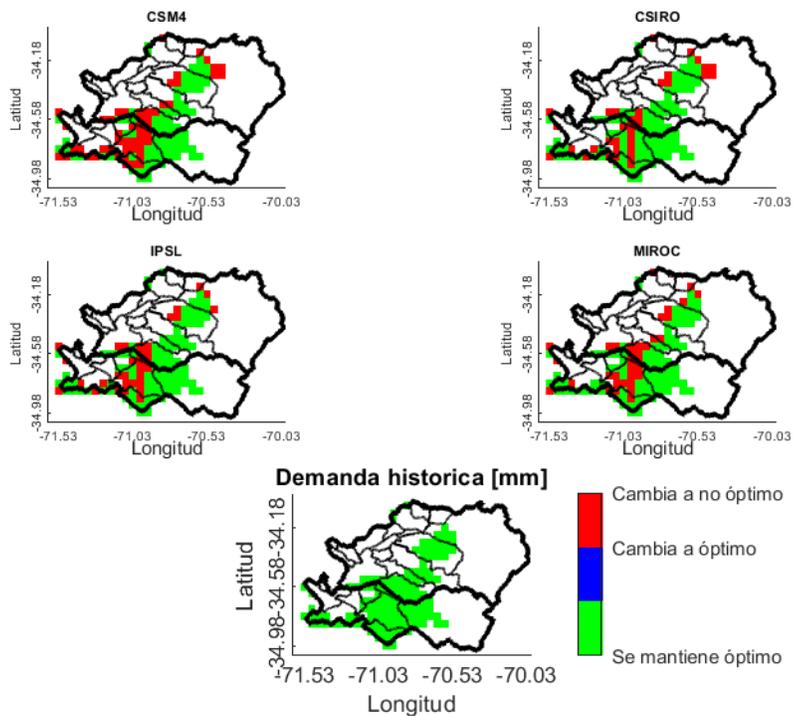
Ubicación óptima 3: Cebolla guarda



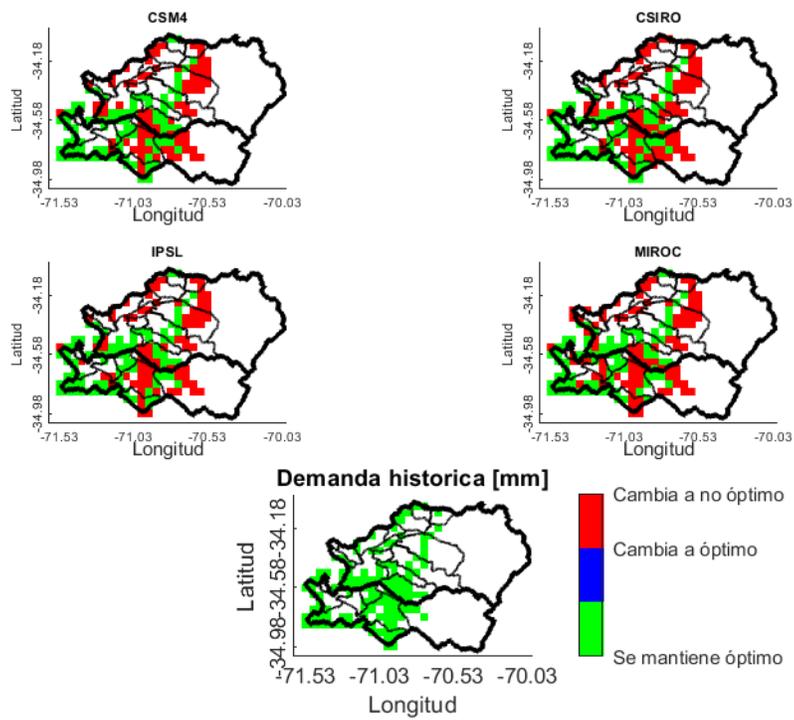
Ubicación óptima 4: Melón



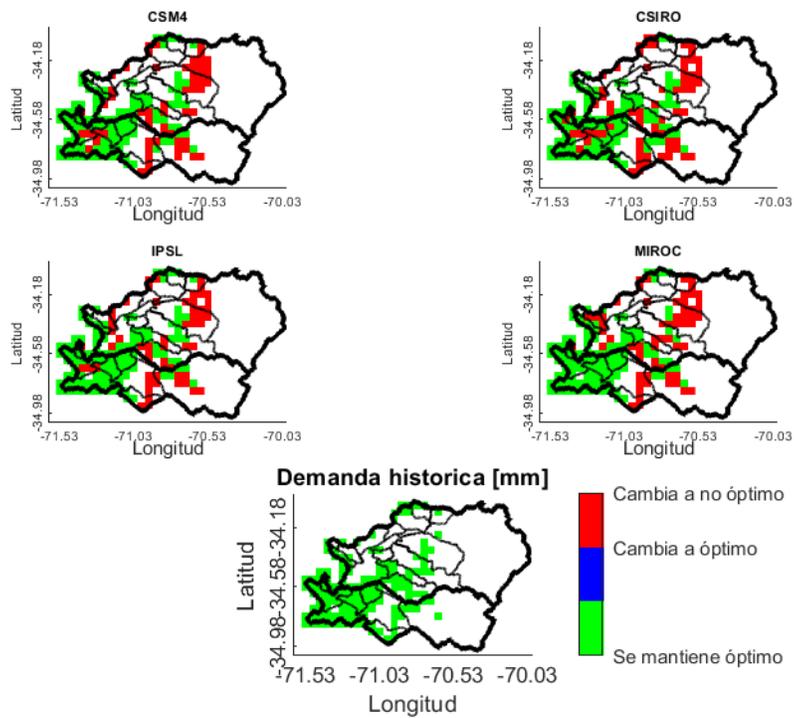
Ubicación óptima 5: Maíz



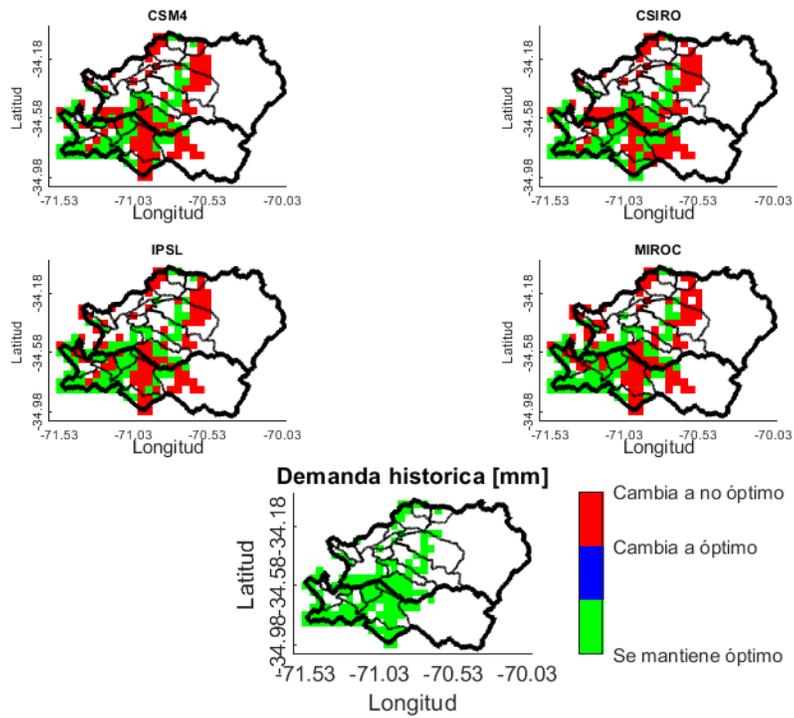
Ubicación óptima 6: Papa



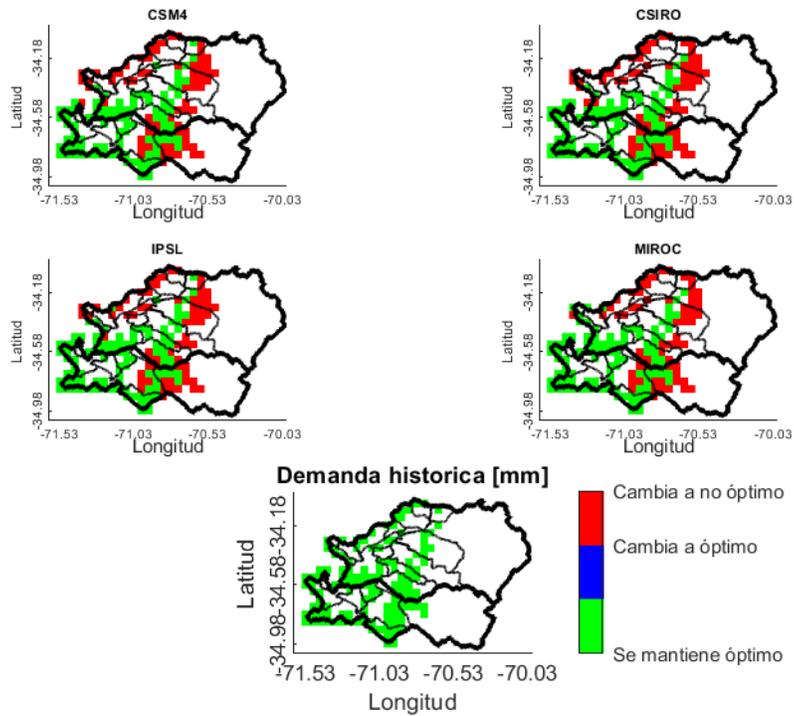
Ubicación óptima 7: Tomate fresco



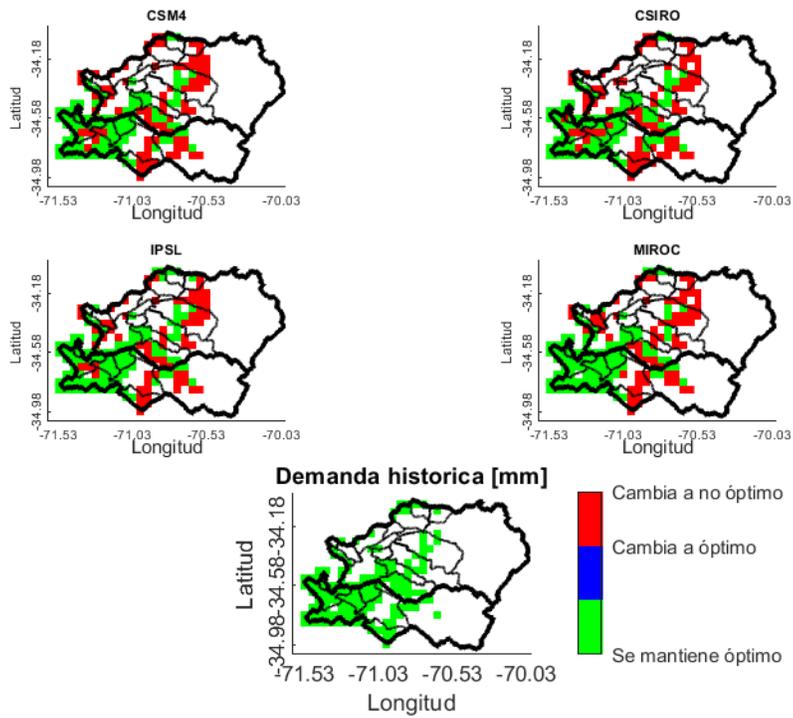
Ubicación óptima 8: Sandía



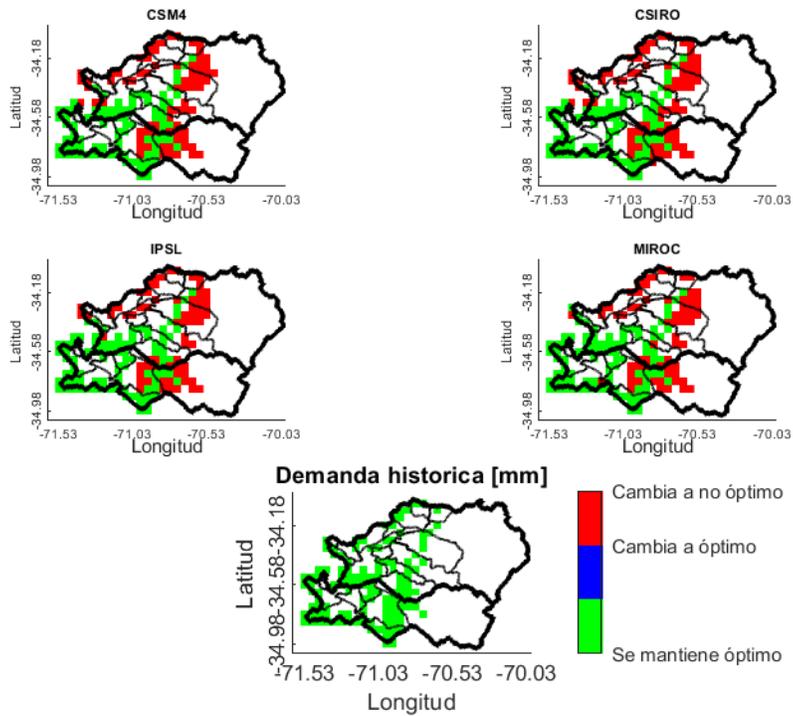
Ubicación óptima 9: Ajo



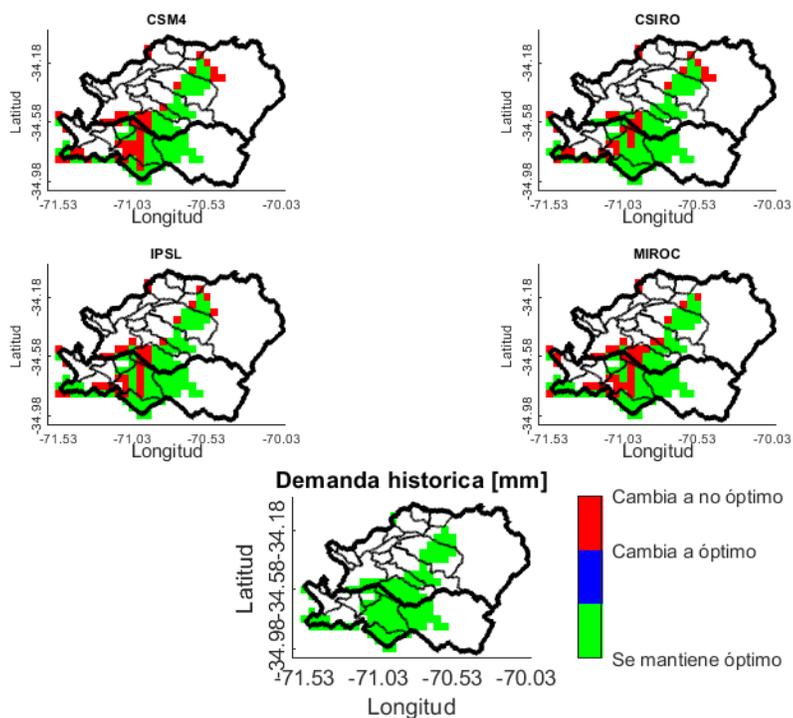
Ubicación óptima 10: Poroto granado



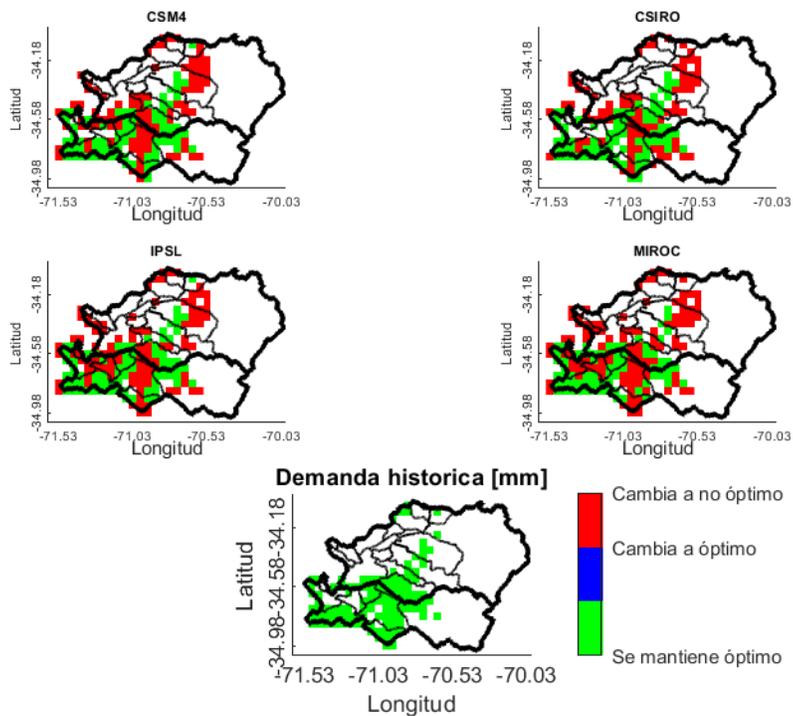
Ubicación óptima 11: Alcachofa



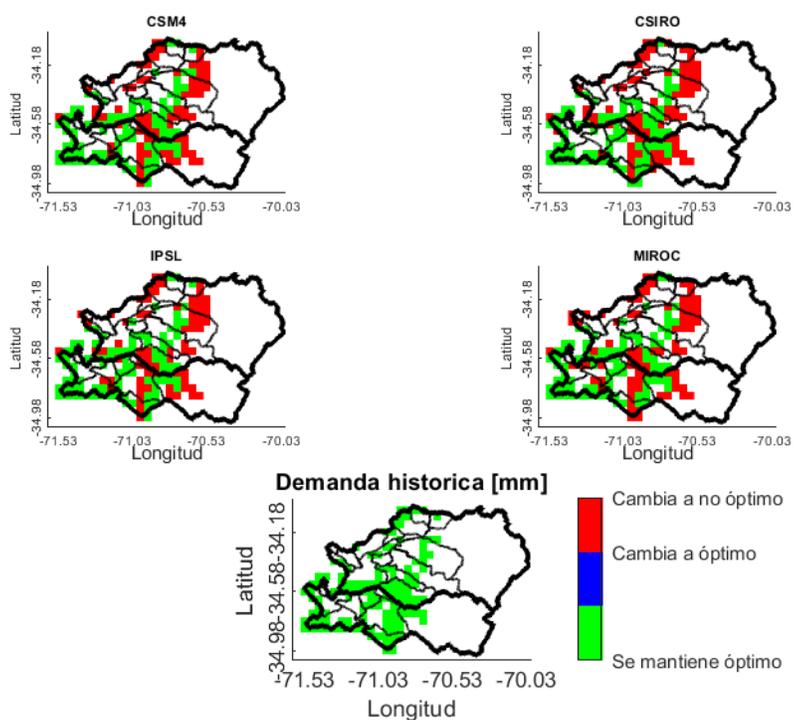
Ubicación óptima 12: Repollo



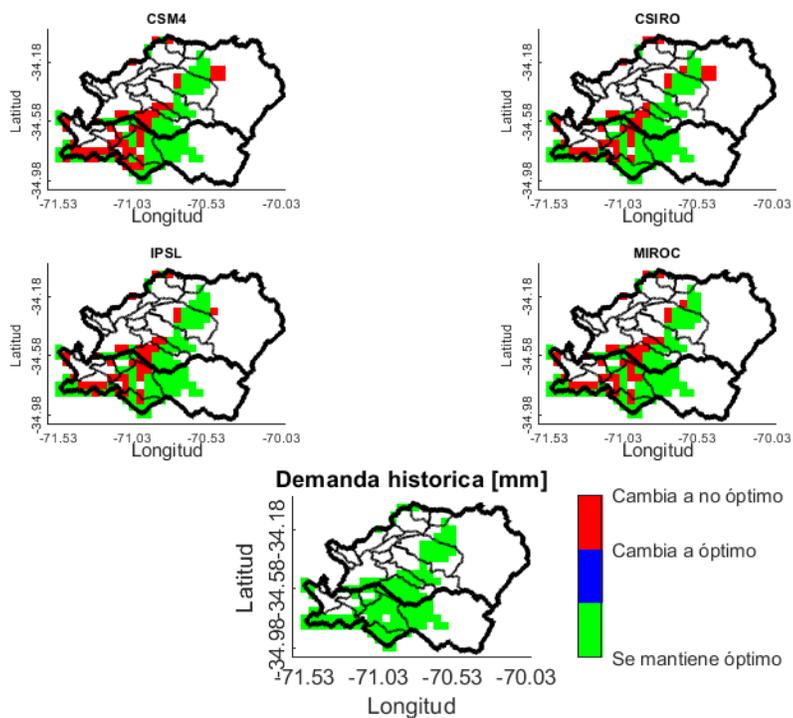
Ubicación óptima 13: Cebolla intermedia



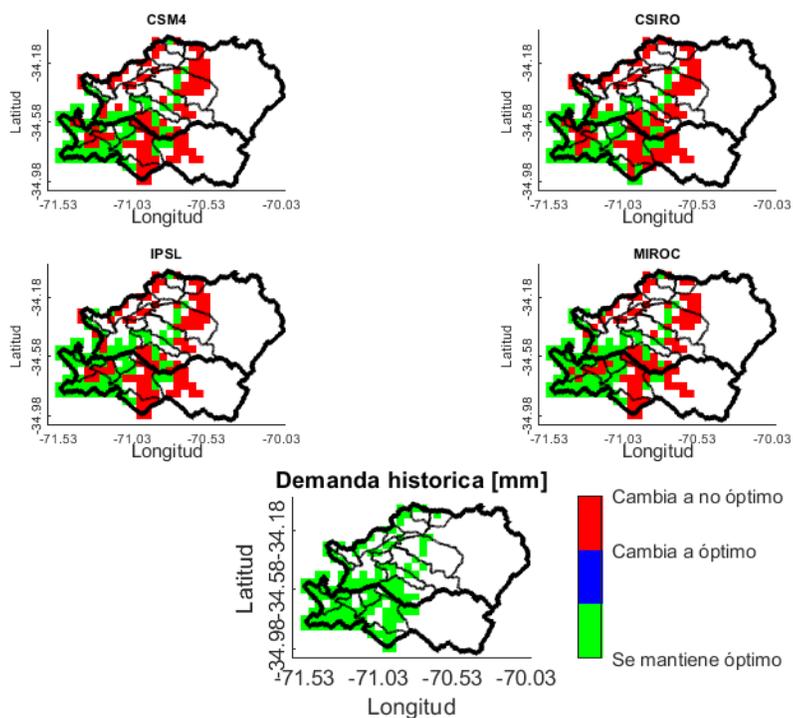
Ubicación óptima 14: Cebolla temprana



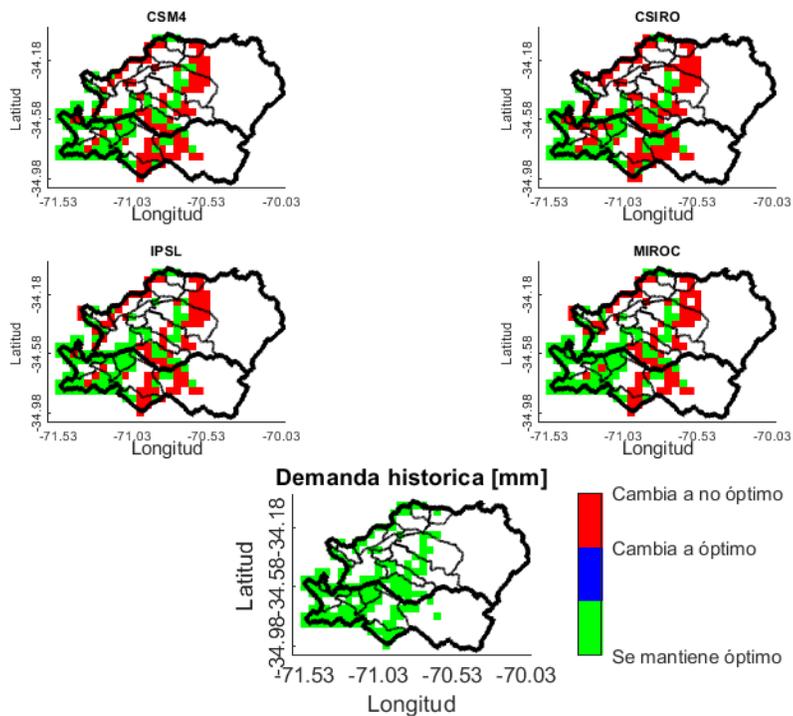
Ubicación óptima 15: Haba



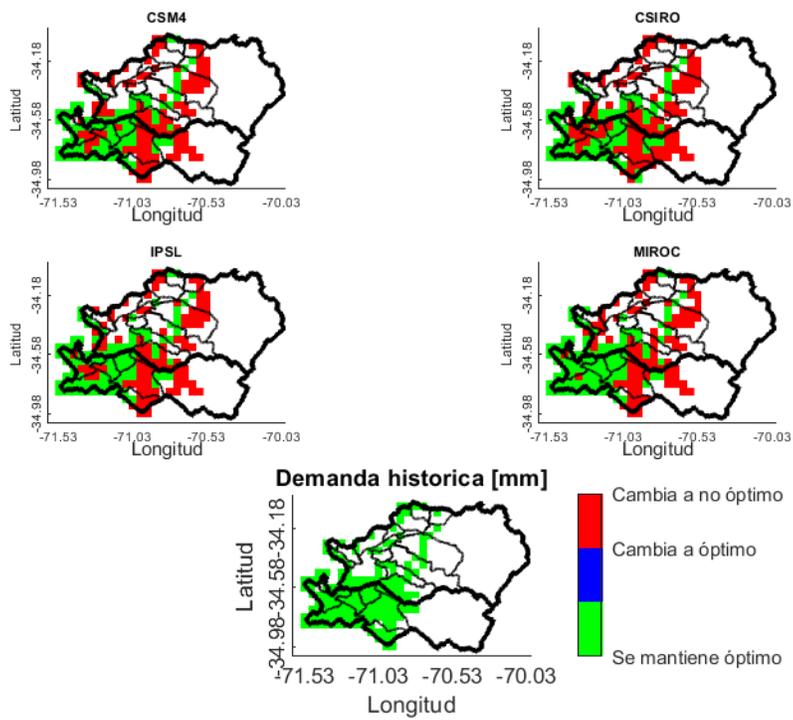
Ubicación óptima 16: Frutilla



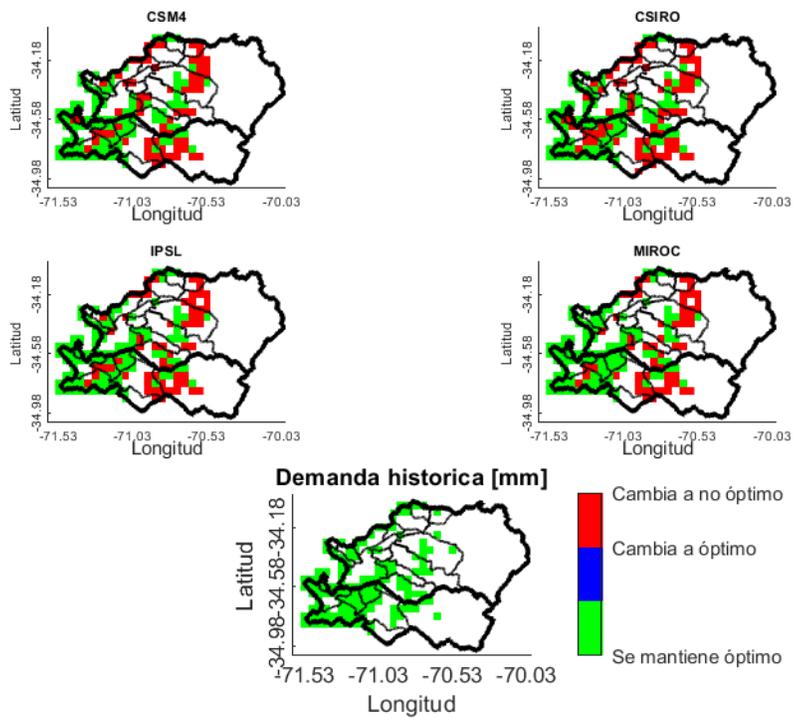
Ubicación óptima 17: Zapallo italiano



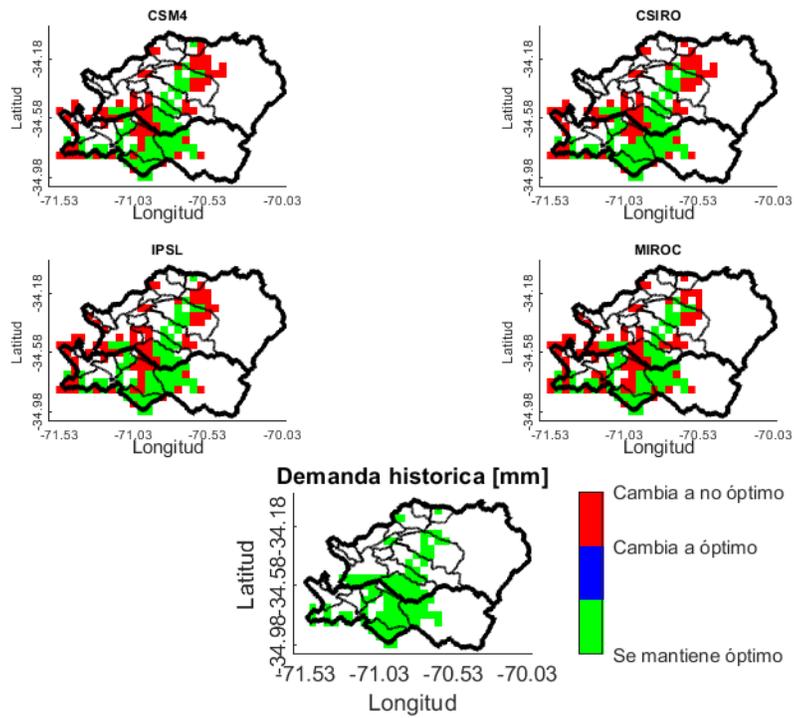
Ubicación óptima 18: Ají



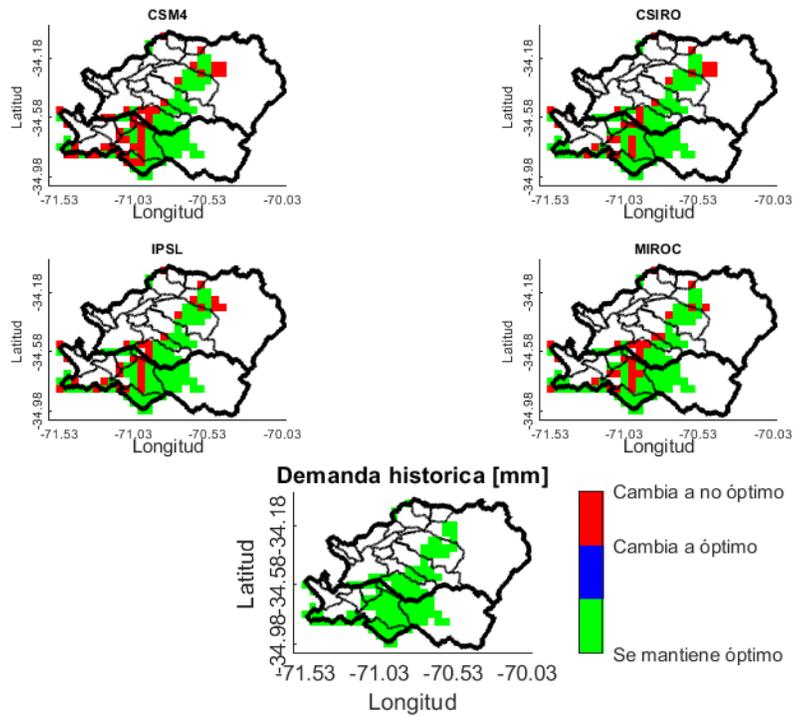
Ubicación óptima 19: Pimiento



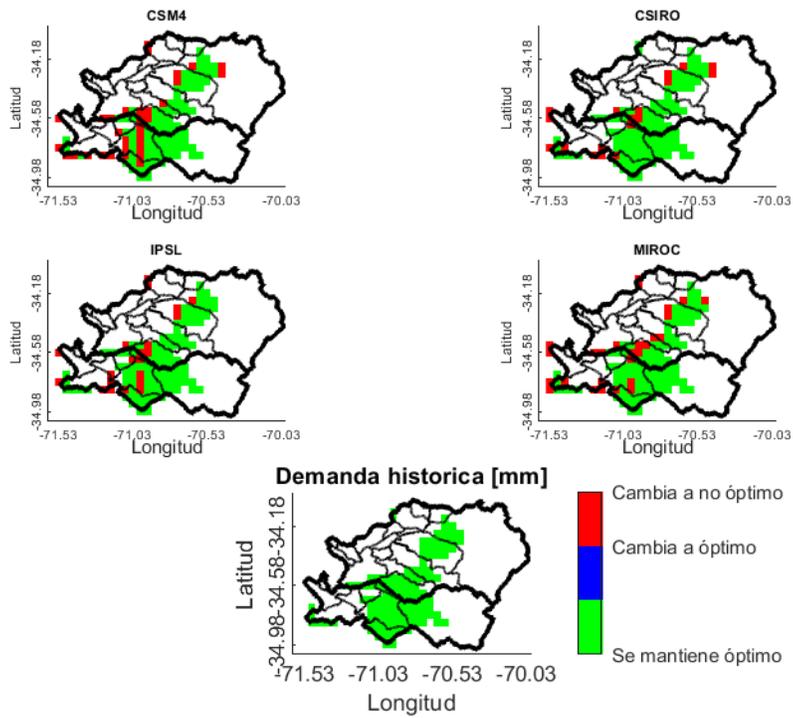
Ubicación óptima 20: Lechuga



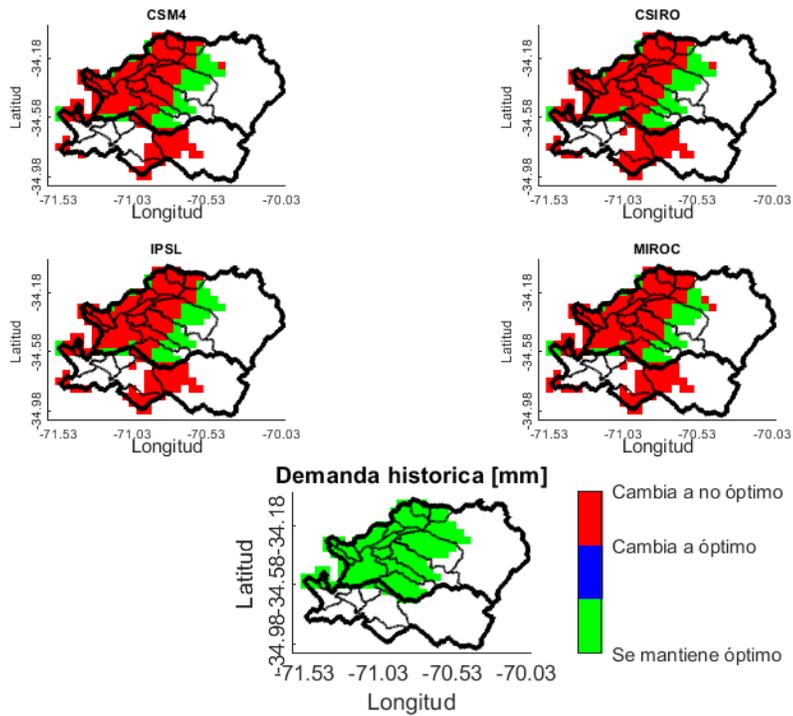
Ubicación óptima 21: Cerezo



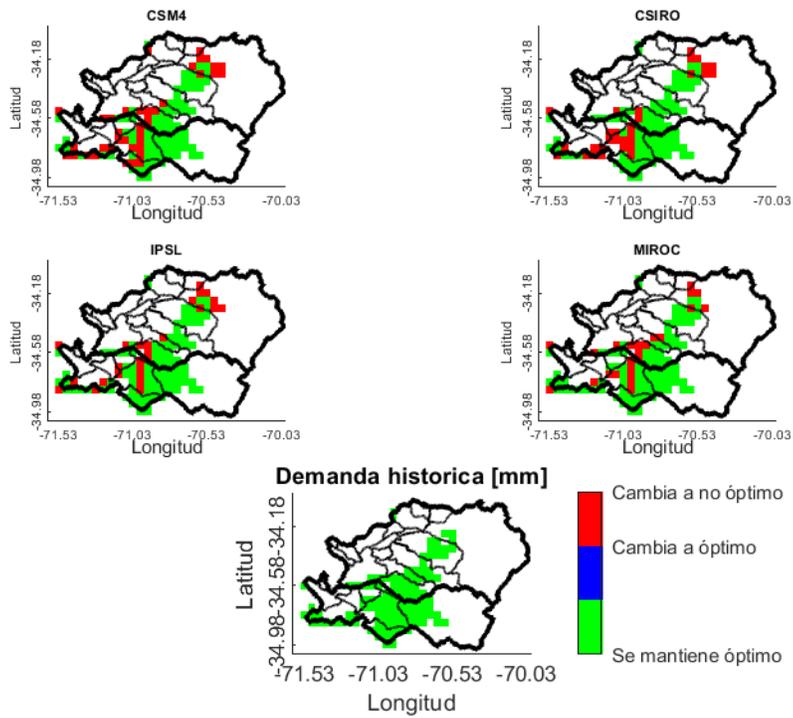
Ubicación óptima 22: Vid de mesa



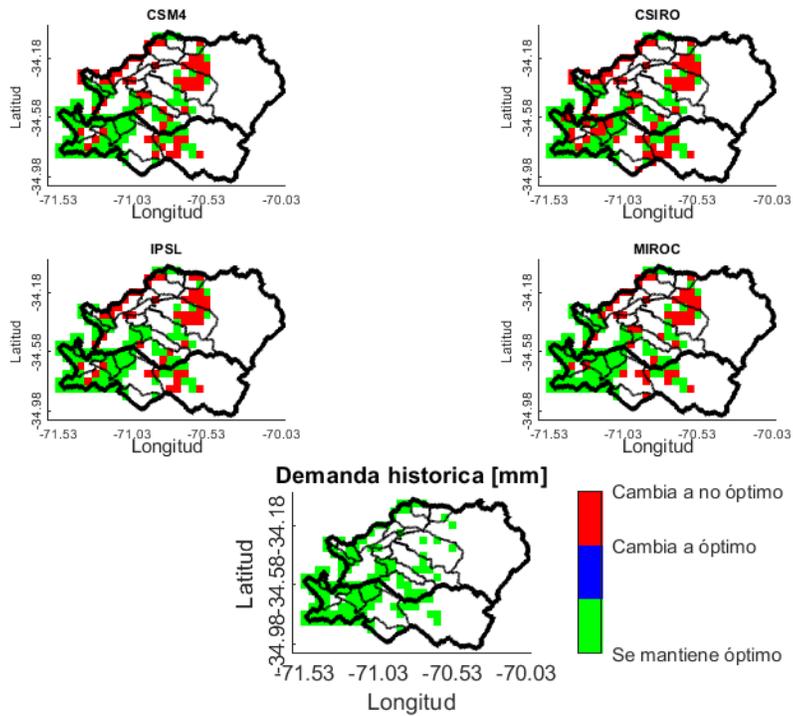
Ubicación óptima 23: Ciruelo europeo



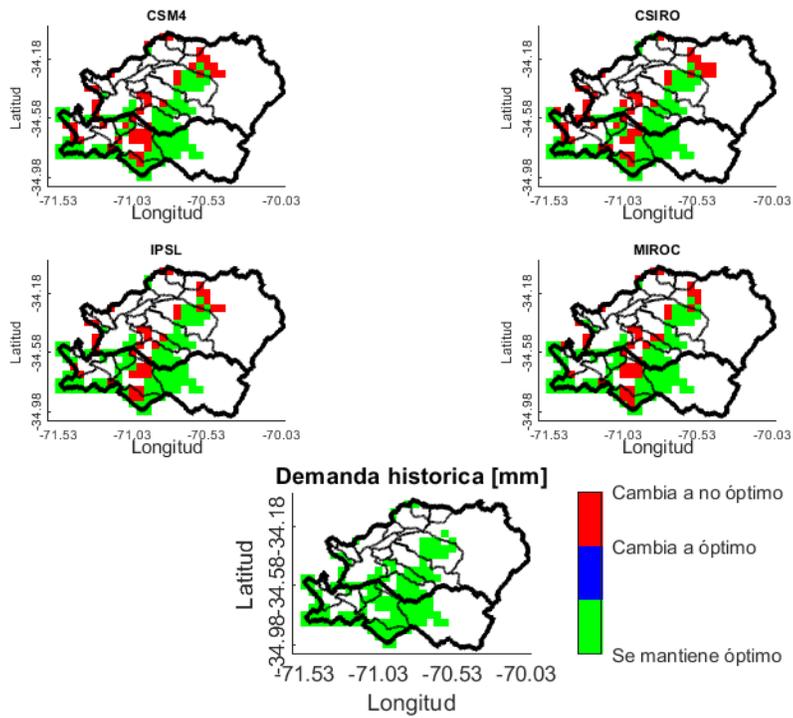
Ubicación óptima 24: Nogal



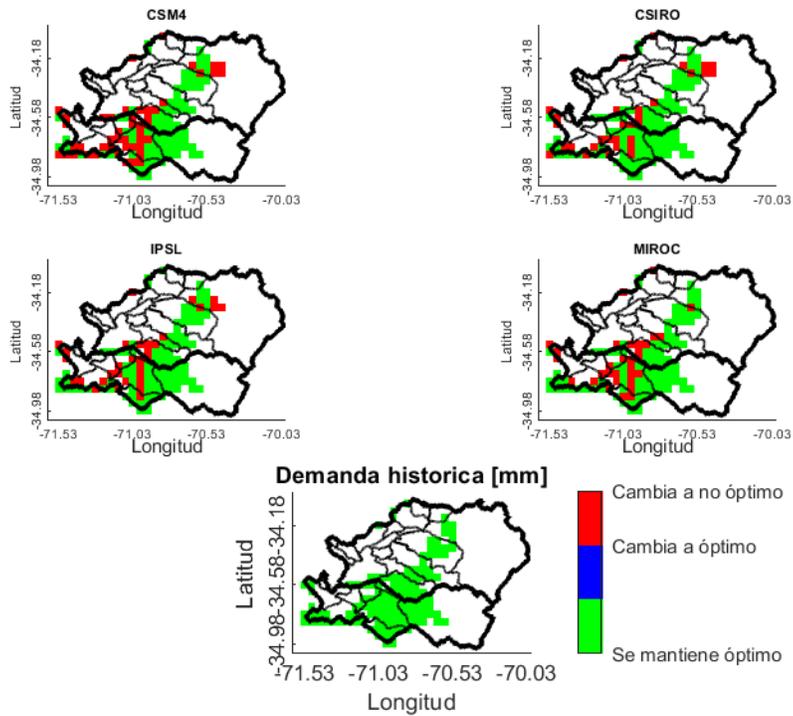
Ubicación óptima 25: Manzano rojo



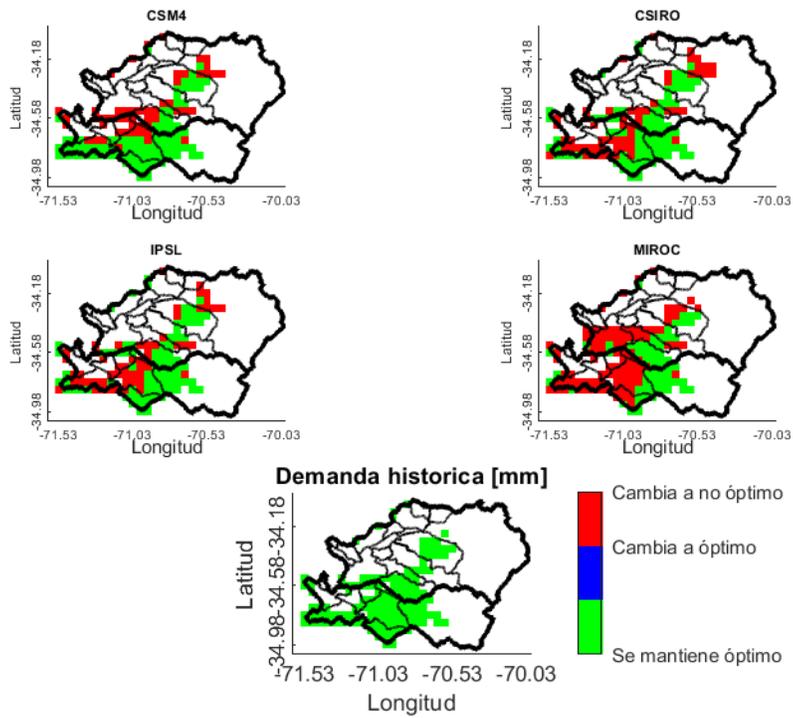
Ubicación óptima 26: Olivo



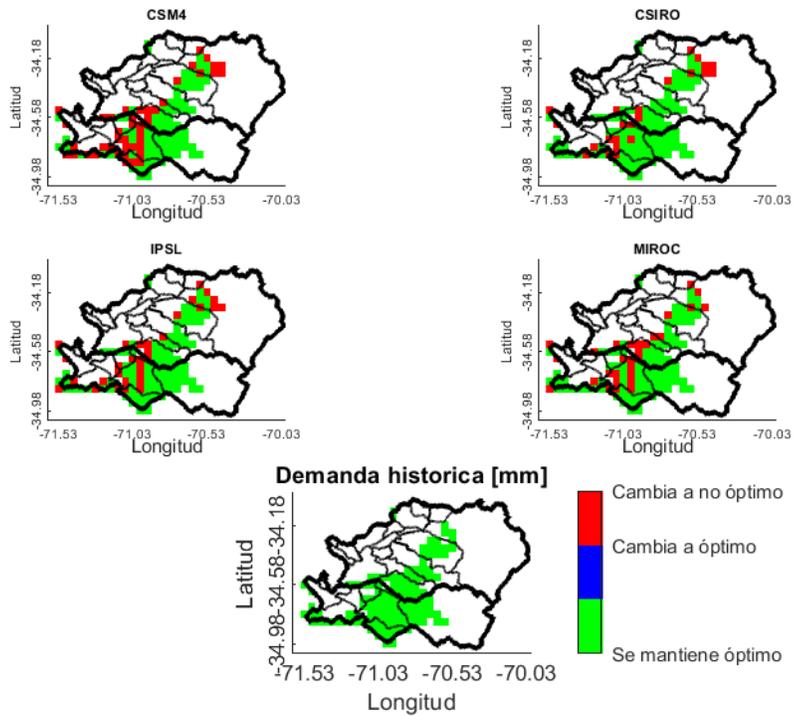
Ubicación óptima 27: Peral



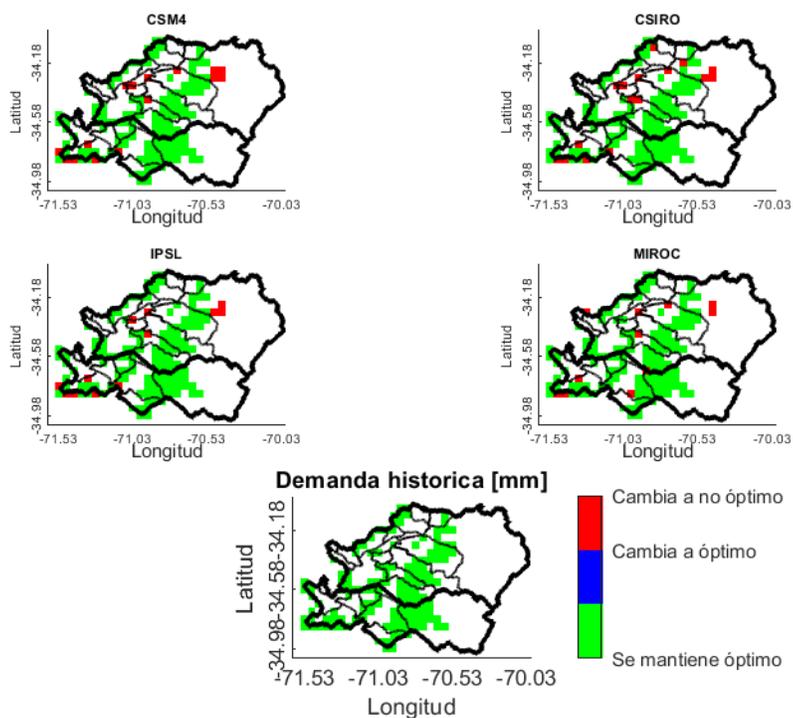
Ubicación óptima 28: Duraznero conservero



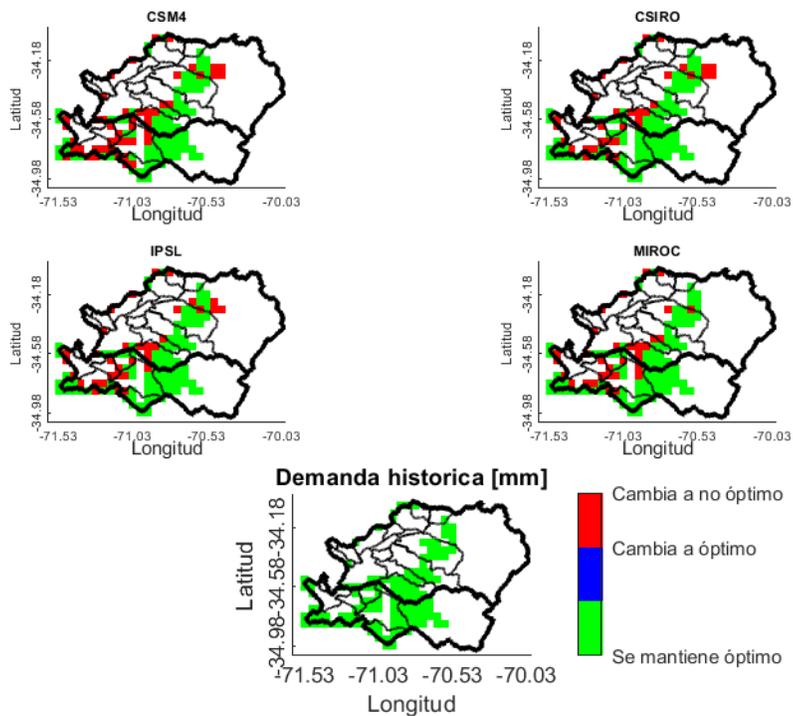
Ubicación óptima 29: Nectarino



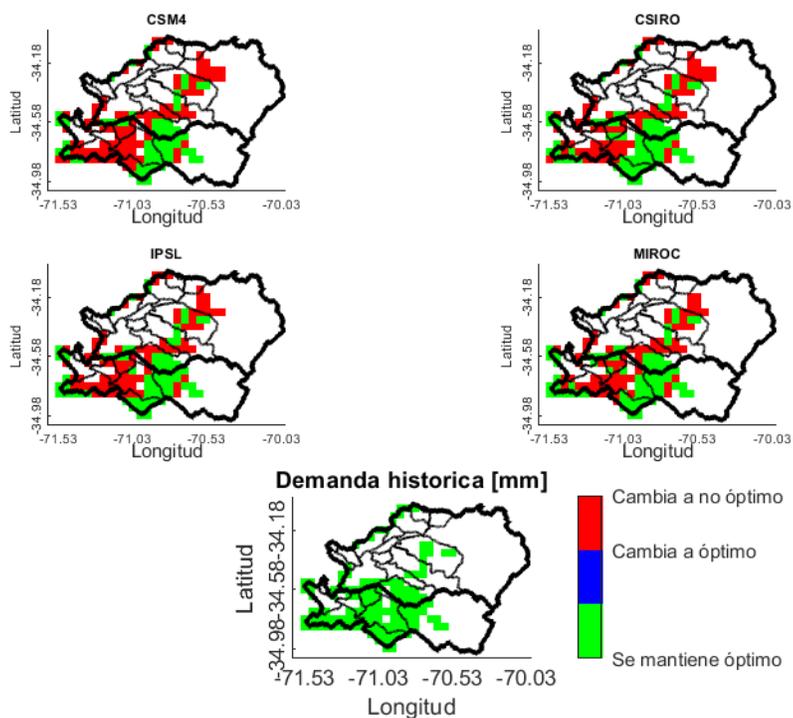
Ubicación óptima 30: Kiwi



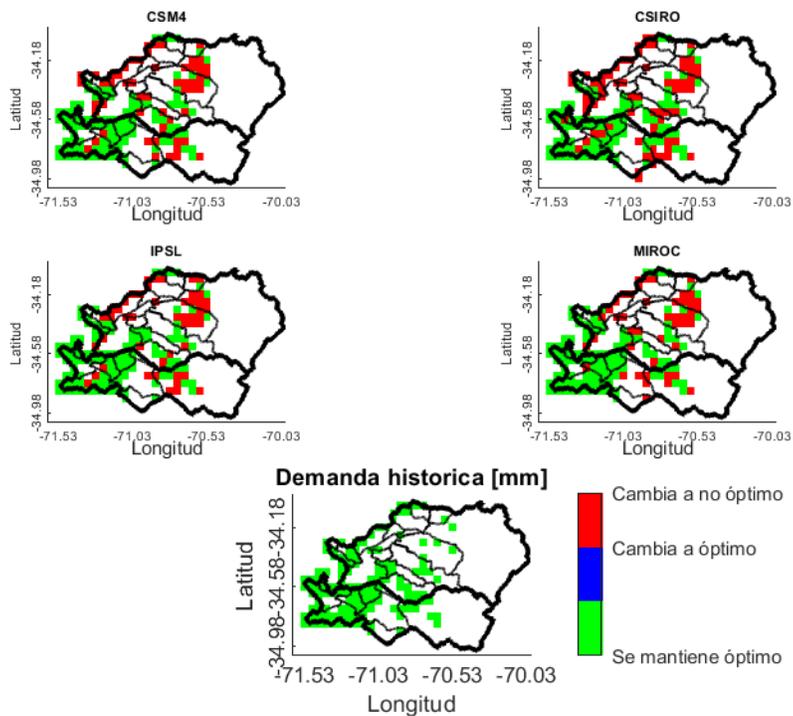
Ubicación óptima 31: Almendro



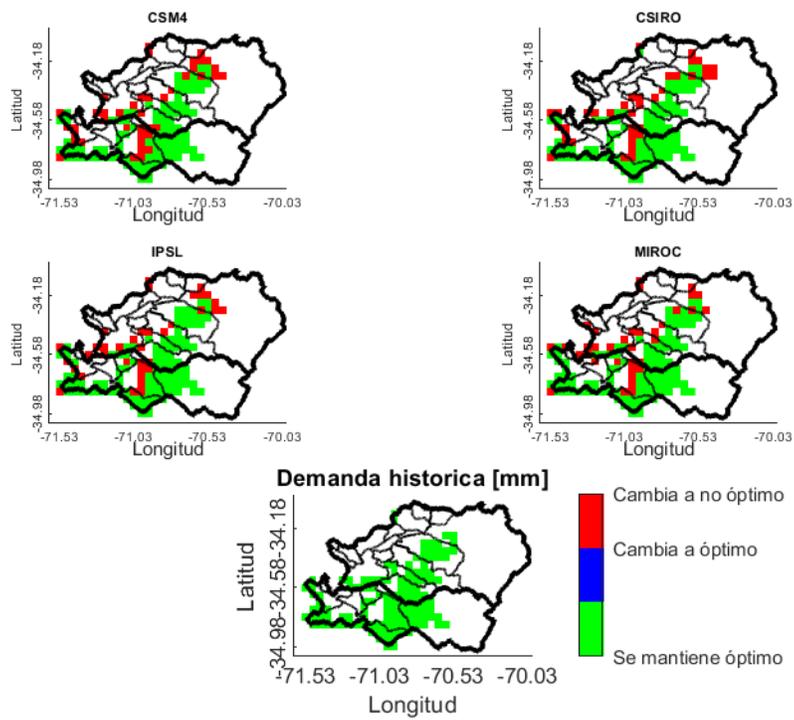
Ubicación óptima 32: Ciruelo Japonés



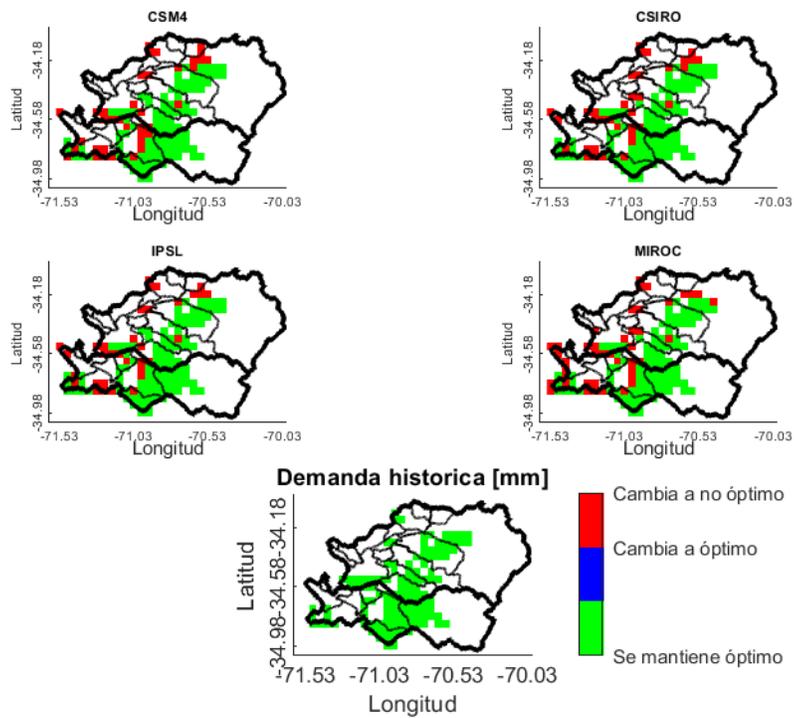
Ubicación óptima 33: Manzano verde



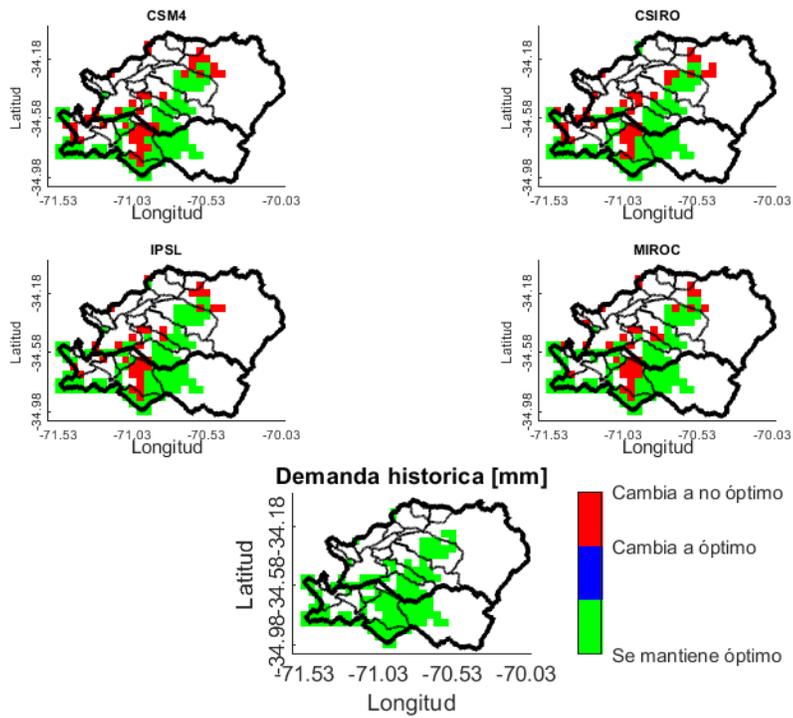
Ubicación óptima 34: Naranjo



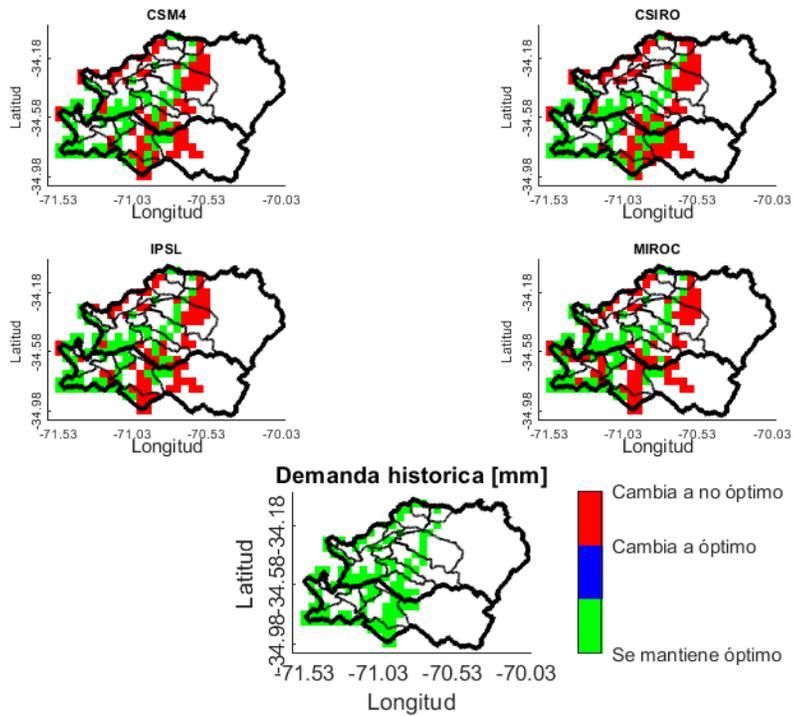
Ubicación óptima 35: Palto



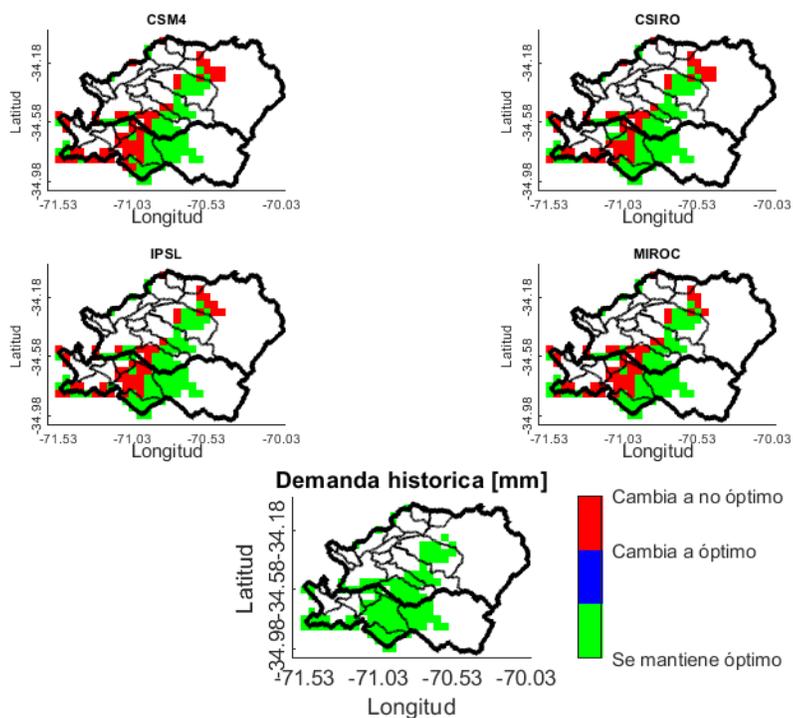
Ubicación óptima 36: Mandarino



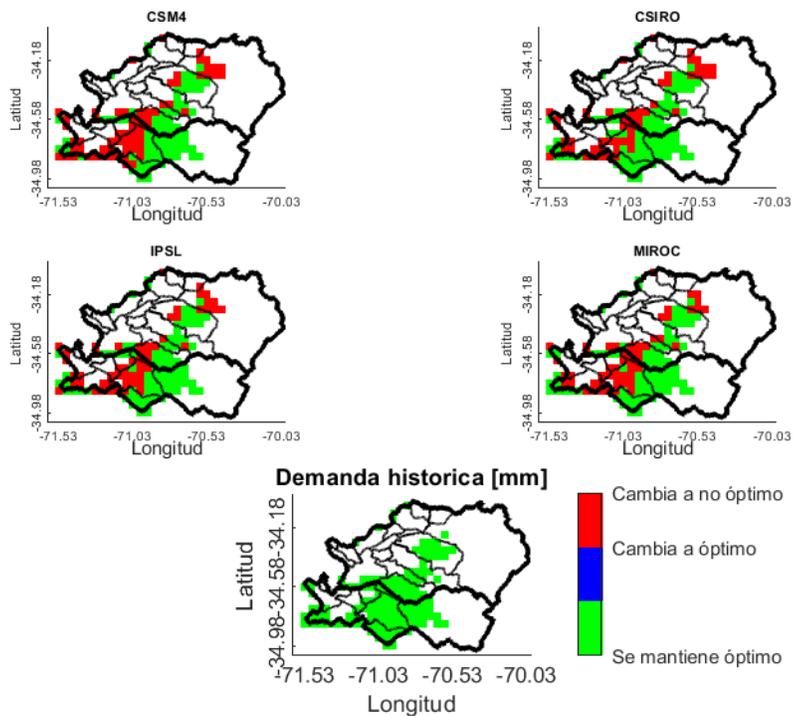
Ubicación óptima 37: Arándano americano



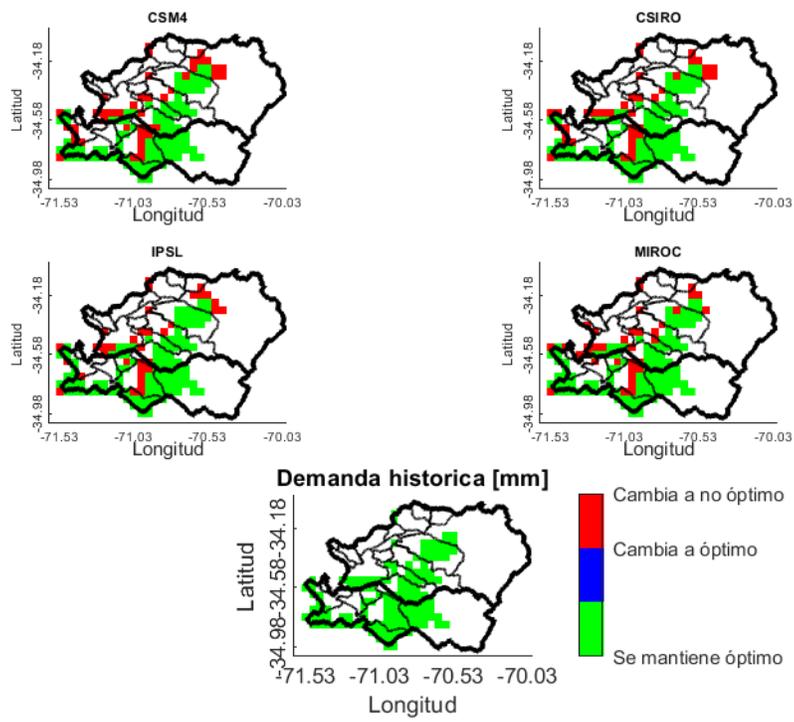
Ubicación óptima 38: Duraznero fresco



Ubicación óptima 39: Pluots



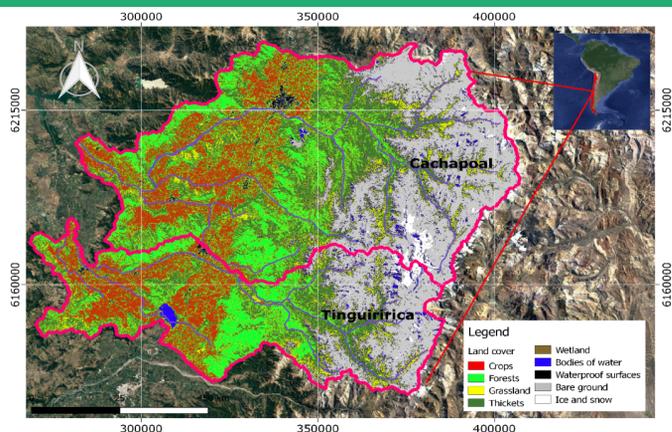
Ubicación óptima 40: Limonero



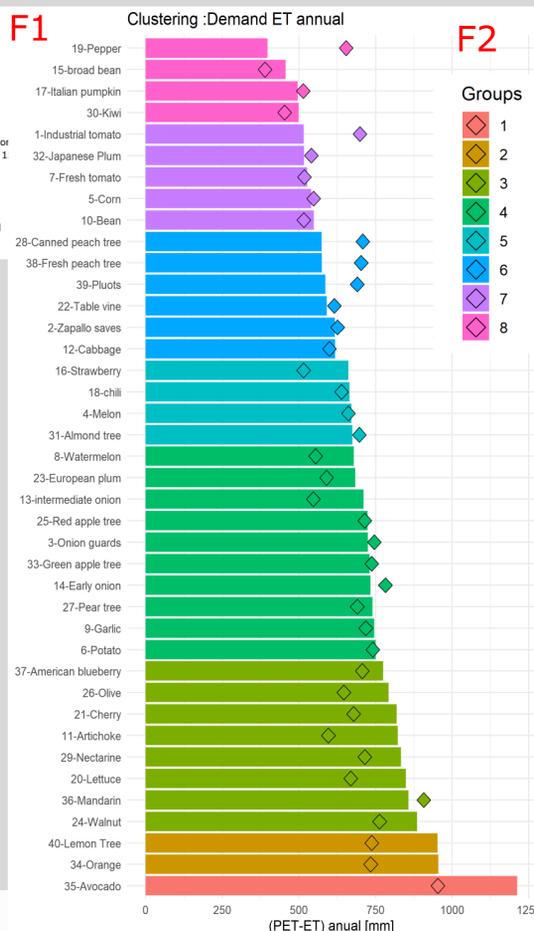
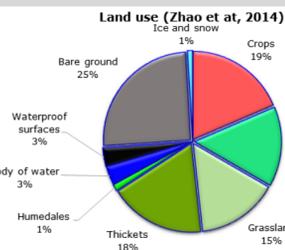
Hydrological response to land use scenarios under climate change. Adaptation measures for an agricultural basin: Rapel river basin in central Chile.

María José González M., Haydee Ximena Vargas M. and Nicolás Vásquez P.
 Department of Civil Engineering, Universidad de Chile

Contact: maria.gonzalez.m@ug.uchile.cl



INTRODUCTION : The Rapel river basin (~34-34°S) is crucial in the development of Chile agriculture, and present a high demand for irrigation (~60% of the total consumed¹) critical facing future water availability. We study the adaptation to climate change for the Rapel river basin based on modification in agricultural land use. The aim is to recommend land-use scenarios for the near future (2040-2060), based on the estimation of evapotranspiration demand with VIC model².



F2: In bars the historical period is represented and as symbols is represented the future (2040-2060).

STUDY ZONE: The Rapel basin is formed from the confluence of the Cachapoal and Tinguiririca rivers (F1). The sub-basin of the Cachapoal and Tinguiririca river has respectively an annual rainfall of 946-1097 mm, area of 6265-3535 km² and an average elevation of 1508-1393 m.a.s.l.

METHODS:

VIC MODEL: For historical forcing (1979-2015) is used the CR2MET³ gridded product, for future forcing (2015-2060) the RCP8.5 scenario is considered, using 4 models: CSM4, CSIRO, IPSL and MIROC. Natural balance was applied, due to the high intervention of the basin. Vegetation parameters are estimated from experimental parametrization and satellite imagery (LANDSAT 8).

AGRICULTURAL SCENARIOS: Agricultural scenarios were defined under 3 steps: and feasible cultivation areas.

- **Optimal crop fraction:** 40 representative crops were selected, the hydrological response was compared between the crops: runoff (E), real evapotranspiration (ET) and potential evapotranspiration (PET). And the evapotranspiration demand was estimated as PET-ET. Eight groups of crops were defined from the Kmeans algorithm.
- **Optimal location:** The entire growing area was simulated with a single class then the optimal locations for each crop class were identified.
- **Feasible cultivation areas:** Cells with a slope of less than 7, 11 and 17 degrees were determined.

The base land use is called (CBC), mixing parametrization of Zhao et al. (2014) (see F1) and data from the 2007 Census of Agriculture and Forestry (INE⁴).

Optimal fraction (OF) scenarios

R25 and R40, reduce the area by 25% and 40% respect to CBC considering actual crop locations. Scenarios S7, S11 and S17 use only optimal locations.

Scenarios with other distributions.

S17C_cbc, S17C_g123 and S17C_g12 consider the cultivation of all cells <= 17° slope. S17C_cbc considers the fraction of the CBC, S17C_g123 consider the cultivation of groups 1-2-3 and S17C_g12 groups 1-2.

T1

Land use scenario	Crops fraction	Crop location	Replace forests, grasslands, or thickets?	Percentage cultivated with respect to the total area	
				Cachapoal	Tinguiririca
cbc	CENSUS-2007	CENSUS-2007	No	20,8%	28,3%
R25	OF	CENSUS-2007	No	15,6%	21,2%
R40	OF	CENSUS-2007	No	12,5%	17,0%
S7	OF	Optimal	No	21,5%	25,3%
S11	OF	Optimal	No	21,7%	25,8%
S17	OF	Optimal	No	21,9%	26,3%
S17C_cbc	CENSUS-2007	All	Yes	31,4%	35,8%
S17C_g123	Groups 1,2 y 3	All	Yes	31,4%	35,8%
S17C_g12	Groups 1,2	All	Yes	31,4%	35,8%

RESULTS:

Groups 1-2-3 have the highest ET demand, corresponding to fruit trees like avocado, citrus, walnut and olive (F2)

Cachapoal and Tinguiririca present historical runoff values of 4408-2901 Mm³. Maximum variation of 3% is observed between scenario S17C_g12 and S17C_cbc, where runoff is not greatly affected by agricultural land use. For both sub-basins, a reduction in runoff is observed of close to 10% for the period 2040 and 20% for 2060 (F3 and F4).

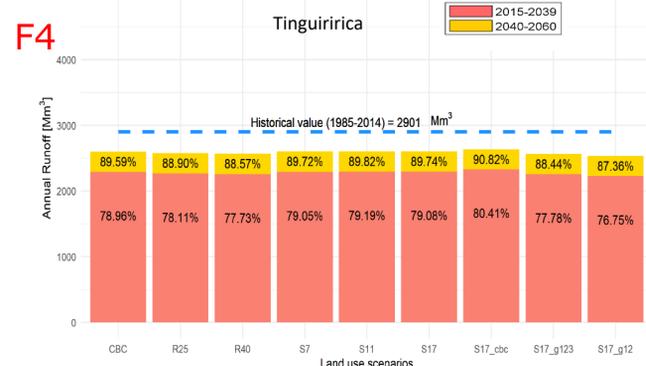
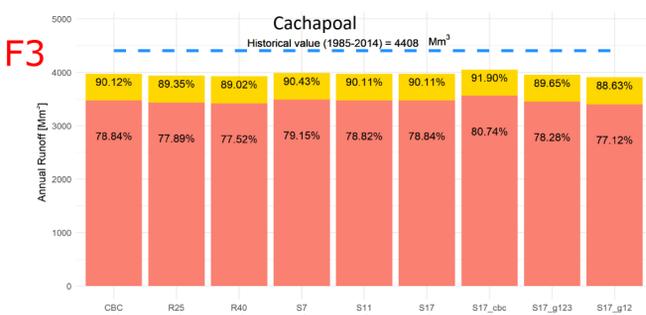
There is a difference of 2% between the demands of the period 2040 and 2060 (F5 and F6). Also, a greater difference is observed between the demands of each scenario from October to March.

In Cachapoal the scenarios ordered according ET demand are: R40 < R25 < S7 < S11 < S17 < CBC < S17_cbc < S17_g123 < S17_g12. While for Tinguiririca the order is: R40 < S7 = S11 = S17 < R25 < S17_cbc < S17C_g123 < S17C_g12, this difference corresponds to that S7, S11 and S17 represent an area reduction, but the main idea is that these scenarios are less demanding to R25, due to the choice of optimal cells (F5 and F6).

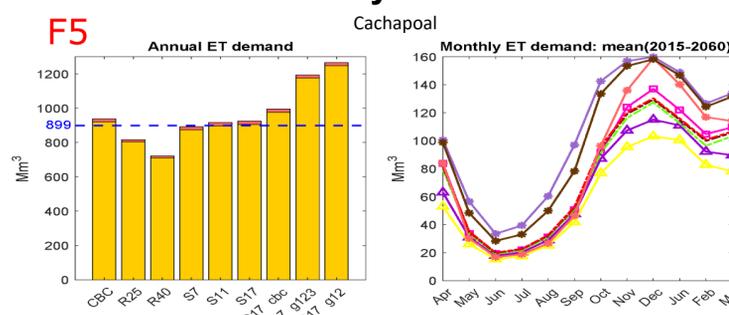
In Cachapoal a deficit is observed between December and March for almost all scenarios, both for 2040 and 2060 (F7)

For Tinguiririca there are no deficits in 2040, but for 2060 all scenarios are in deficit between March to December and except for R40 (F8)

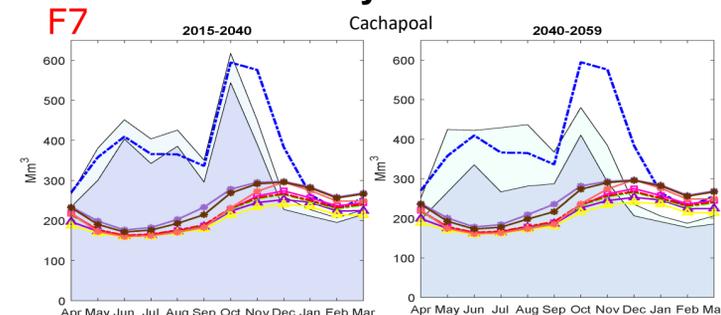
Annual Runoff



Monthly ET demand



Monthly balance



In F3 and F4 we have the annual runoff volumes for each scenario (in yellow (2040) and red (2060)), whose percentages represent the value of the period with respect to the historical (see blue segmented line).

In F7 and F8, the monthly runoff available for the period 2040 and 2060 is plotted as area, and as lines the ET demands are added to the demands for surface water from other services such as (drinking water, industry, mining, others).¹

CONCLUSIONS

In general, a runoff reduction of 10% is expected in 2040 and 20% for 2060. This reduction occurs at the peak of melting from October to March affects directly the availability of water for irrigation, when a higher evapotranspiration demand occurs. In the annual balance, the available surface water is enough for the irrigation demand, but monthly will be a deficit in the most demanded months. Then it is necessary to work on water management that allows storage for crucial months. This work concludes local differences in runoff due to the of agricultural land use, but in the entire basin, the impact is ~2-3%. In Cachapoal it is recommended an area reduction scenario such as R40, however, for Tinguiririca for the period 2040, the R25, S7, S11, S17 or S17_cbc is recommended and for 2060 the scenario R40 (see table T1). Looking at the demands of S17_cbc, S17_g12 and S17_g123, the importance of the adequate distribution of crops is patent. Remarking with the crop location and the crop choice are important factors, and a turn away into a agriculture-focused on fruit trees is not recommended.

¹ DGA[CHILE]. <https://dga.mop.gob.cl/>
² Liang, Xu, Lettenmaier, Dennis P. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. Journal of Geophysical Research, vol. 99(D7), 14,415-14,428, jul. 1994.
³ CR2MET: <http://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>
⁴ INE (Chile) <https://www.ine.cl/>
 Zhao, Y., Feng, D., Xiu, L., Wang, X., Chen, Y., Hernández, H.J., Galleguillos, M., Estades, C., Biging, G., Radke, J. & Gong, P. 2016. Detailed dynamic land cover mapping of Chile: accuracy improvement by integrating multi-seasonal land cover data. Remote Sensing of Environment 183, 170-185.
 Powered@NLHPC. This research was partially supported by the supercomputing infrastructure of the NLHPC (ECM-02).

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ADAPTACIÓN FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO. PROPUESTA DE CAMBIO DE
MATRIZ DE CULTIVOS EN LA CUENCA DEL RÍO RAPEL**

MARÍA JOSÉ GONZÁLEZ MOLINA.¹
XIMENA VARGAS MESA.²
NICOLÁS VÁSQUEZ PLACENCIA.³

RESUMEN

Según las proyecciones dadas por el cambio climático, se espera en Chile un aumento de la temperatura y disminución de la precipitación. La cuenca del Río Rapel, ubicada en Chile Central, presenta una actividad agrícola relevante económicamente, que depende de la disponibilidad hídrica estival, por lo que su desarrollo es sensible a las proyecciones futuras climáticas. Por esta razón, este trabajo se centra en el estudio de las modificaciones del uso de suelo agrícola y cambio climático en la cuenca del Río Rapel, con el fin de plantear recomendaciones al uso de suelo actual. Se utiliza el modelo hidrológico VIC (Variable Infiltration Capacity) y se simula la cuenca en régimen natural, en base a los registros meteorológicos históricos (1979-2014) y forzantes futuras (2015-2060) derivadas de cuatro modelos de circulación global, asociadas al escenario de emisiones de dióxido de carbono RCP8.5.

A nivel de celda, se identifican diferencias en la escorrentía según cultivo, sin embargo, a nivel de cuenca solo se aprecian diferencias en la demanda evapotranspirativa entre escenarios. Se proyecta una reducción de la escorrentía con respecto al periodo histórico, de cerca de 10% para el periodo (2015-2039) y de 20% para el periodo (2040-2059). Se concluye que todos los escenarios planteados, entre diciembre a marzo, proyectan déficit en Cachapoal, mientras que en Tinguiririca se identifican escenarios sin déficit. Debido a la disponibilidad de agua a nivel anual, es necesario tomar medidas de almacenamiento de la escorrentía para los meses de déficit.

¹Memorista, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – maria.gonzalez.m@ug.uchile.cl

²Profesora Asociada, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – xvargas@uchile.cl

³Ingeniero Civil, M.Sc., Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – nicolas.vasquez.pl@uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático, proyecta a nivel nacional en aumento de la temperatura y disminución de la precipitación (INFODEP, 2016), lo cual tiene efecto directo en la disponibilidad hídrica proyectada. Otros, agentes como las propiedades físicas del suelo tienen influencia en la respuesta hidrológica (Dunn & Mackey, 1995), así también, las alteraciones en la cubierta vegetal pueden influir en propiedades como la rugosidad de la superficie terrestre o el índice del área foliar, entre otros, que pueden generar cambios en el balance de energía superficial y en la evapotranspiración (Pielke & Avissar, 1990; Greene et al., 1999). De hecho, el cambio de uso de suelo puede afectar la frecuencia de inundaciones, las pérdidas por evaporación a la atmósfera, el contenido de humedad del suelo, la escorrentía y los patrones del flujo base (Mao & Cherkauer, 2009).

De este modo, es urgente estimar la disponibilidad hídrica futura, considerando ambos aspectos, cambio climático y modificaciones de uso de suelo. Para ello, es de utilidad los modelos hidrológicos, que permiten representar los procesos físicos del ciclo del agua. En particular, la modelación hidrológica es útil para predecir inundaciones, sequías, recarga de aguas subterráneas e intercambio tierra-atmósfera, y es una herramienta relevante para el desarrollo de estrategias de planificación y gestión de recursos hídricos (Hrachowitz & Clark, 2017).

En particular, el modelo VIC (Variable Infiltration Capacity; Liang et al., 1994) corresponde a un modelo hidrológico distribuido y de base física, el cual resuelve balances de masa y de energía. Fue desarrollado por Xu Liang en la Universidad de Washington y ha sido aplicado en varias cuencas. Ejemplos de esto, son los estudios de cambio de uso de suelo y/o cambio climático desarrollado en: río Qingyi en China (Liu et al., 2013), río Yellow en China (Cuo et al., 2013), río Pennar de India (Garg et al., 2017), entre otros.

Dado que la Cuenca del Río Rapel se constituye como una zona donde la actividad agrícola es de importancia, es necesario analizar medidas de adaptación a las nuevas condiciones de limitación de recurso hídrico dadas por el cambio climático. Según el Atlas del agua (MOP, 2016) esta Macrozona posee uno de los suelos más fértiles de Chile, debido a la abundancia de agua producto de los deshielos, lo que ha conducido a la producción de una gran variedad de frutas y hortalizas, mayoritariamente para exportación. Sin embargo, según Bozkurt et al. (2018), considerando el escenario de mayor emisión de dióxido de carbono, es decir, RCP8.5, se espera para esta zona una reducción de la precipitación, cuyos valores medios son: un 10% para el 2040, de 18% para el 2070 y 30% para el 2100, con respecto al periodo histórico, lo cual tendría efecto en la disponibilidad hídrica para el desarrollo de la agricultura y otros usos.

En este contexto, este trabajo se basa en el análisis de la respuesta hidrológicas en base a cambio de uso de suelo agrícola y cambio climático, para ello se simulan las subcuencas del río Tinguiririca y río Cachapoal, en el modelo hidrológico VIC. Para llevar a cabo la serie de simulaciones se utiliza el supercomputador Leftraru del Centro de Modelamiento Matemático (CMM) de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, de la Universidad de Chile. Y se considera el trabajo base realizado por el proyecto “Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las cuencas de las macrozonas Norte y Centro” (DGA, 2018)

2. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio corresponde a la cuenca del río Rapel, ubicada en Chile Central (~34-35°S), cuya área comprenden la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins y la Región del Maule. El río Rapel se compone de las subcuencas del río Cachapoal (Código BNA 6019003) y río Tinguiririca (Código BNA 6035001) (Ver Figura 1). La subcuenca del Río Cachapoal comprende un área de 6265 [km²], mientras que la subcuenca del Río Tinguiririca comprende un área de 3.535 [km²].

Debido a la necesidad de conocer las áreas de cultivos de la zona de estudio, es de utilidad el uso de suelo desarrollado por el Laboratorio de Geomática y Ecología de Paisaje GEP (Zhao et al., 2016), el cual se presenta en la Figura 1.

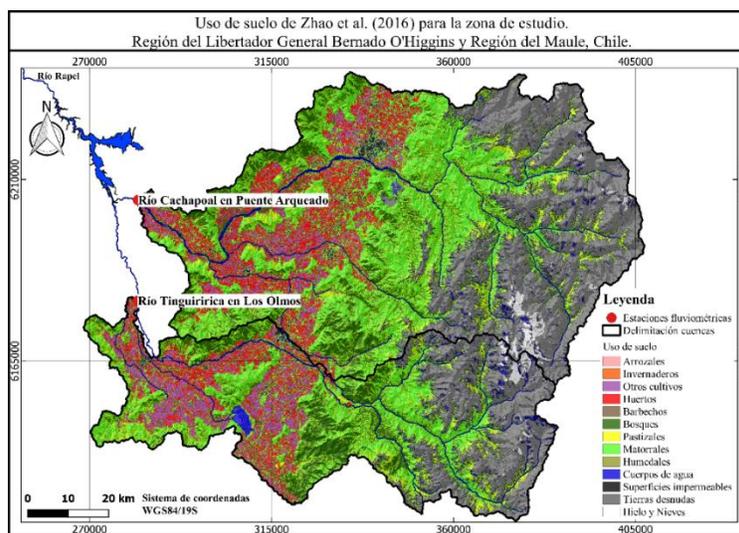


Figura 1: Uso de suelo de la Cuenca del Rapel. Fuente: (Zhao et al., 2016)

A partir del uso de suelo de Zhao et al. (2016) de la Figura 1, en la cuenca del Rapel, se tiene un 19% de cultivos (que incluye: arrozales, invernaderos, huertos, barbechos y otros cultivos), un 15% de bosques, un 15% de pastizales, un 18% de matorrales, 3% de cuerpos de agua, 3% de superficies impermeables, 25% tierras desnudas y 1% de hielo y nieves.

3. METODOLOGÍA

Para conocer la respuesta hidrológica bajo diferentes usos de suelo agrícola, se simulan ambas subcuencas en el periodo histórico (1979-2014) y en el periodo futuro (2015-2060). Para las forzantes históricas se utiliza el producto grillado CR2MET (DGA, 2018). Para las forzantes futuras, se utilizan los modelos de circulación global: CCSM4 (Community Climate System Model), CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), IPSL (Institut Pierre Simon Laplace), y MIROC (Model for Interdisciplinary Research on Climate), asociados al escenario de emisiones de dióxido de carbono RCP8.5. Dichos modelos se denominan en adelante como GCMs y son obtenidos de DGA (2018), al igual que los parámetros de suelo.

El uso de suelo base, se denomina CBC y utiliza el área de cultivo dada por el uso de suelo de Zhao et al. (2016) y comprende un conjunto de 40 cultivos representativos de la zona de estudio. Dichos

cultivos se distribuyen en el área de cultivo según el porcentaje dado por el Censo Agropecuario y Forestal del año 2007 del Instituto Nacional Estadística (INE). De esto modo, el CBC es un uso de suelo que presenta un mayor detalle en cuanto a agricultura. Los 40 cultivos comprenden 19 frutales, 1 viñedo, 14 hortalizas y 6 anuales.

Para representar los cultivos en el modelo VIC, se estiman los parámetros de vegetación propios para cada cultivo. Los parámetros LAI (índice de área foliar, en sus siglas en inglés) y albedo, son estimados a partir de información derivada de las imágenes Landsat 8 y dos catastros agrícolas (el Catastro Hortícola del 2017 y el Catastro Frutícola del 2018, ambos de CIREN). Otros parámetros, como la resistencia mínima estomática, radiación mínima a la que se inicia la transpiración, profundidad y distribución de las raíces en cada capa, altura del cultivo y la fracción del tronco libre de hojas, se estiman en base a bibliografía.

Análisis a nivel de celda

En una primera instancia, se evalúa la respuesta hidrológica promedio por cultivo, de modo de estimar su demanda evapotranspirativa (denominada en adelante como DE). En este estudio, la DE representa la estimación del requerimiento hídrico de la planta, la cual se estima como la diferencia entre la evapotranspiración potencial (PET) y la evapotranspiración real (ET), ambas derivadas de la modelación.

Para cada cultivo, se simulan todas las celdas factibles de cultivar, tanto en el periodo histórico como el futuro. Las celdas factibles de cultivar se definen como aquellas que se encuentran bajo el límite de la cota 1000 (m.s.n.m) y de la pendiente de 17°, comprendiendo el límite erosivo según García (1954). Para comparar la respuesta hidrológica de cada cultivo, se utiliza el promedio anual en el periodo respectivo y promedio entre celdas factibles de cultivar.

Debido a la similitud entre algunos cultivos, se plantean grupos, donde el grupo 1 es el de mayor demanda evapotranspirativa y el grupo 8 el de menor demanda. Dicha clasificación se realiza aplicando el algoritmo Kmeans y la minimización de la distancia euclidiana, en base a los valores promedio de escorrentía, índice de aridez (P/PET) y demanda evapotranspirativa (PET-ET).

A partir de la asignación de grupos, se define una “distribución óptima” de cultivo, la cual en base al CBC reduce el porcentaje de los grupos demandantes y aumenta el porcentaje de los grupos de menor demanda. Además, se obtiene la “ubicación óptima” de los cultivos, al identificar las celdas que reportan una DE menor o igual al promedio entre celdas factibles de cultivar.

Análisis a nivel de celda

Para el periodo futuro, se evalúa el CBC y los escenarios futuros propuestos por subcuenca. Los escenarios planteados se definen en base a una “distribución óptima”, o bien, utilizan la distribución base dada por el Censo 2007; además, utilizan “zonas óptimas” o bien, emplean todas las celdas disponibles dadas por su área máxima. Las áreas máximas por cultivar se definen de acuerdo con la pendiente de terreno, las cuales son: de 7°, 11° y 17°, asociada a 12%, 20% y 30% por ciento de pendiente, respectivamente. Esto es debido a que en 12% de pendiente se inicia la erosión del terreno y en 30% se establece el límite erosivo según el trabajo de García (1954). El cálculo de dichas áreas se realiza en base al modelo de elevación digital ALOS PALSAR (ASF DAAC, 2019).

En la Figura 2 se presenta un diagrama de cómo se definen estos escenarios, clasificados de acuerdo con la distribución de cultivos adoptada.

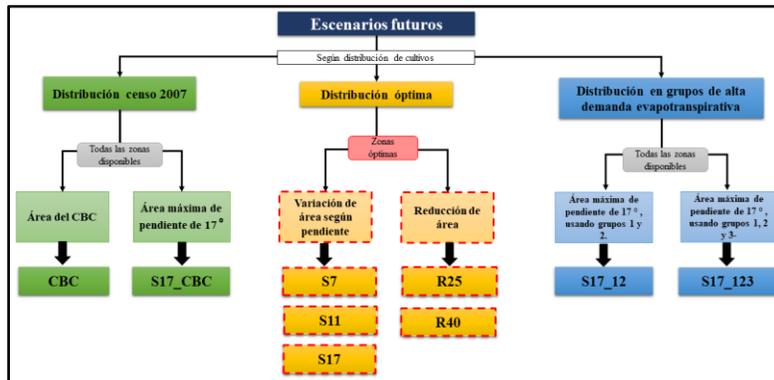


Figura 2: Diagrama definición escenarios futuros.

Los escenarios CBC y S17_CBC, utilizan la distribución de cultivos del CBC, dada por el Censo del 2007, el primero es el caso base histórico y el segundo es una proyección de aumento de área hasta el límite de 17° de pendiente. En ambos casos, se emplean todas las celdas disponibles, incluyendo celdas óptimas y no óptimas.

En la distribución óptima de cultivo, se tiene los escenarios de área máxima dada por las pendientes de 7° (S7), de 11° (S11) y de 17° (S17), los cuales solo consideran las celdas óptimas presente en su área máxima. Además, se plantean dos escenarios de reducción de área de cultivo: reducción de un 25% (R25) y de un 40% (R40) con respecto al área cultivada del CBC, que utilizan celdas óptimas presentes hasta la pendiente de 7°, de modo de privilegiar las zonas planas, de mayor acceso.

Finalmente, se utiliza la distribución en grupos de alta demanda evapotranspirativa, donde se emplea el total de área disponible hasta la pendiente de 17°, lo cual comprende celdas óptimas y no óptimas. Donde el escenario S17_12 posee los cultivos del grupo 1 y 2, y el escenario S17_g123 emplea los cultivos de los grupos 1, 2 y 3, donde el grupo 1 es el más demandante y el 8 el menos demandante.

Para analizar la relación entre demanda y disponibilidad, a la DE derivada de los escenarios, se agregan los derechos de aprovechamiento de agua, derivados del trabajo de Budde et al. (2019). Debido a que el modelo VIC, trabaja a nivel superficial, se emplean solo los derechos de agua de tipo consuntivo y superficial, con usos distintos al de riego. Cabe mencionar que la demanda evapotranspirativa de los escenarios considera el solo el área con cultivos agrícolas, excluyendo las otras clases de vegetación, por ello, los resultados son presentados en términos de volumen.

4. RESULTADOS

Análisis a nivel de celda

En la Figura 3, en (A) se presenta la DE anual de cada cultivo, correspondiente al promedio entre celdas factibles de cultivar y promedio anual, ordenados según DE, donde el grupo 1 es el más

demandante. Luego en (B) se presenta la escorrentía, ordenados de menor a mayor escorrentía. En barras se presenta el resultado del periodo histórico (1984-2014) y en rombo el resultado en el periodo futuro (2015-2059), mientras que el color corresponde al grupo al cual pertenece, el cual se define según las forzantes históricas.

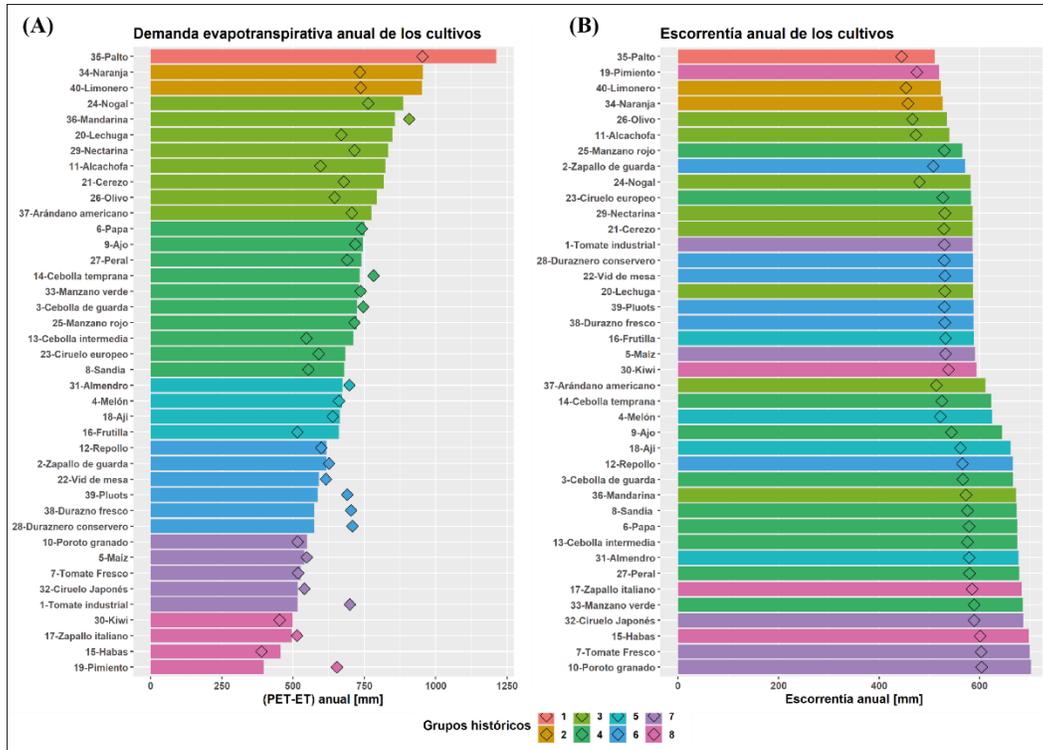


Figura 3: Demanda evapotranspirativa (A) y escorrentía promedio (B) por cultivo, cuyos colores definen al grupo al cual pertenecen. En barras se representa el periodo histórico y en rombos el periodo (2015-2059).

En (A) que la DE varía de 300 a 1250 mm/año entre cultivos, donde el grupo 1 contiene solo al Palto, el cual en el periodo futuro disminuye su demanda promedio, pero sigue siendo el más demandante del conjunto; el grupo 2 contiene a los cítricos (naranja y limonero); y el grupo 3 se compone de seis frutales y dos hortalizas (la lechuga y alcachofa). Luego en los grupos menos demandantes, se destaca el grupo 6 que contienen frutales como vid de mesa, el durazno fresco y conservero. Luego el grupo 7, comprende al kiwi y ciruelo, tomate industrial, tomate fresco, maíz, y poroto granado. Luego en cuanto a la comparación entre periodo histórico y futuro, se observa que en los frutales la mayoría disminuye su demanda evapotranspirativa, a excepción del nogal, almendro, pluots, durazno fresco y conservero, que aumentan su demanda evapotranspirativa. Y en las hortalizas, el pimiento, tomate y cebolla temprana aumenta en cierta medida su demanda evapotranspirativa, mientras que el resto mantiene o disminuye su valor.

Luego (B) se aprecia que la escorrentía varía en un rango menor de 500 a 700 mm/año, donde los grupos 1 y 2, junto con el pimiento, presentan menor escorrentía. Luego, al ir aumentando la demanda no se observa una tendencia clara donde los cultivos más demandantes sean los de menor escorrentía. Sin embargo, en los valores de mayor escorrentía se identifican principalmente cultivos del grupo 7 y 8. Además, en la comparación entre el periodo histórico y futuro, se identifica que

todos los cultivos reducen la escorrentía en el periodo futuro, manteniendo la relación que poseen entre sí en el periodo histórico, salvo excepciones.

Cambio estacional proyectado a nivel de cuenca

Con ello, en Figura 4, para cada subcuenca, se presenta en (A) la climatología para el CBC en el periodo histórico (1985-2014), donde en línea continua se presenta los valores medios y en sombra el delta de error de los datos de cada año del periodo histórico. En (B) y (C), se presenta el cambio del monto mensual de cada variable en los periodos futuros (2015-2039 y 2040-2059, respectivamente), con respecto al promedio del periodo histórico, considerando los cuatro GCMs.

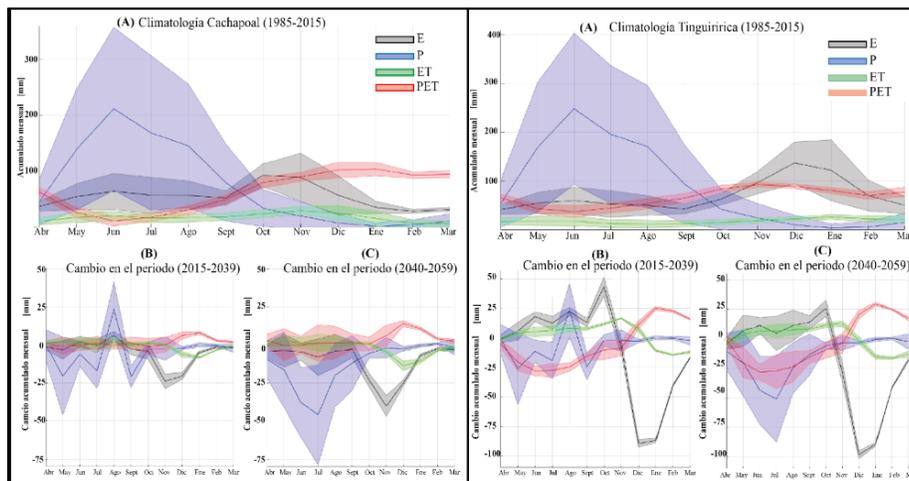


Figura 4: En (A) la climatología, en (B) el cambio en el periodo (2015-2039) y en (C) el cambio en el periodo (2040-2059) con respecto al promedio del periodo histórico.

En la Figura 4, para la subcuenca de Cachapoal, en (A) se aprecia que la precipitación alcanza los 200 mm/mes en junio, principalmente entre abril y octubre. La escorrentía (E) presenta su máximo valor entre octubre y noviembre llegando a los 100 mm/mes, apreciándose un segundo máximo en junio de 70 mm/mes, lo que verifica el régimen nivo-pluvial de la subcuenca. La DE tiene su mínima en el mes de junio alcanzando 10 mm, y entre octubre a marzo se encuentra la máxima DE cercana a los 100 mm/mes. En los meses de julio la DE es cercana a 0 por la presencia de precipitación. Y la evapotranspiración (ET) presenta valores relativamente constantes.

En Tinguiririca en (A) se aprecia un mayor nivel de precipitaciones que en Cachapoal, las cuales se presentan entre los meses de abril a octubre. El valor máximo se presenta en el mes de junio, cuyo valor medio es de 250 mm/mes. La escorrentía presenta su mayor magnitud en el mes de diciembre con 140 mm/mes, observándose también un valor máximo en el mes junio de 70 mm/mes, lo que ratifica el régimen nivo-pluvial de la subcuenca. El máximo de la DE se encuentra entre los meses de diciembre a enero. Y la ET presenta valores relativamente constantes.

En el futuro, para ambas subcuencas se proyecta un déficit de precipitación en los meses preferentes de lluvias (de abril a septiembre), presentando un leve aumento de las precipitaciones en agosto. Y se proyecta una disminución de la escorrentía de deshielo en los meses de septiembre a octubre, donde en Tinguiririca esto va acompañado de un leve aumento de la escorrentía de abril a octubre.

Análisis a nivel de cuenca

En la Tabla 1 se presenta las distribuciones de porcentajes por grupos de cultivos, aplicada en los escenarios, por cada subcuenca. Y en la Tabla 2 se presentan las características de cada escenario planteado.

Tabla 1: Distribución de cultivos aplicado en los escenarios planteados.

Porcentaje de cada grupo de cultivos por escenario.									
Subcuenca Cachapoal					Subcuenca Tinguiririca				
Grupo	Censo	Óptima	g12	g123	Grupo	Censo	Óptima	g12	g123
1	2,6%	2,6%	50%	33%	1	0,20%	0,2%	50%	33%
2	3,6%	3,6%	50%	33%	2	1,4%	1,4%	50%	33%
3	9,2%	6,7%	0%	33%	3	6,4%	6,4%	0%	33%
4	11,8%	9,3%	0%	0%	4	11,0%	8,0%	0%	0%
5	7,7%	12,7%	0%	0%	5	10,0%	13,0%	0%	0%
6	30,4%	30,4%	0%	0%	6	21,5%	21,5%	0%	0%
7 y 8	34,6%	34,6%	0%	0%	7 y 8	49,5%	49,5%	0%	0%

En la Tabla 1 se aprecia en la distribución base del Censo 2007, que cada subcuenca presenta mayor porcentaje de grupos menos demandantes, donde en la subcuenca de Cachapoal se presenta mayores porcentajes en los grupos 3, 4, 6, 7 y 8, y en Tinguiririca se tiene mayores porcentajes en los grupos 4, 5, 6, 7 y 8. A su vez los grupos 1 y 2 son los menos cultivados en ambas subcuencas. En base a esto, Tinguiririca posee una distribución inicial de cultivos menos demandantes que Cachapoal.

Tabla 2: Características de los escenarios futuros y el CBC, para la subcuenca de Cachapoal (C) y Tinguiririca (T).

Escenario de uso de suelo	Distribución de cultivos	¿Utiliza todas las zonas o solo las óptimas?	¿Reemplaza bosques, pastizales y matorrales?	Porcentaje celdas óptimas utilizadas		Porcentaje de área cultivada c/r área total		Porcentaje de área cultivada c/r área del CBC	
				C	T	C	T	C	T
CBC	Censo 2007	Todas	No	-	-	20,8%	28%	100%	100%
R25	Óptima	Todas	No	100%	100%	15,6%	21%	75%	75%
R40	Óptima	Todas	No	100%	100%	12,5%	17%	60%	60%
S7	Óptima	Óptima	No	85%	88%	21,5%	25%	103%	89%
S11	Óptima	Óptima	No	78%	83%	21,7%	26%	104%	91%
S17	Óptima	Óptima	No	70%	73%	21,9%	26%	105%	93%
S17C_cbc	Censo 2007	Todas	Sí	70%	73%	31,4%	36%	151%	126%
S17C_g12	Grupos 1 y 2	Todas	Sí	70%	73%	31,4%	36%	151%	126%
S17C_g123	Grupos 1, 2 y 3	Todas	Sí	70%	73%	31,4%	36%	151%	126%

De la Tabla 2 se aprecia que los escenarios de pendiente (S7, S11 y S17) comprenden escenarios de leves aumentos de áreas con respecto al CBC para Cachapoal, mientras que para Tinguiririca

comprenden reducción, esto debido a que se seleccionan solo las celdas óptimas disponibles en el área máxima. Y los escenarios S17_cbc, S17c_g12 y S17_g123, debido a que no se disponen de suficientes áreas con suelo desnudo, para completar dicha área máxima se debió cambiar las clases de bosques, pastizales y matorrales por cultivos.

Cambio escorrentía a nivel de cuenca

En la Figura 5 se presenta los valores anuales es de escorrentía para cada escenario y en cada periodo.

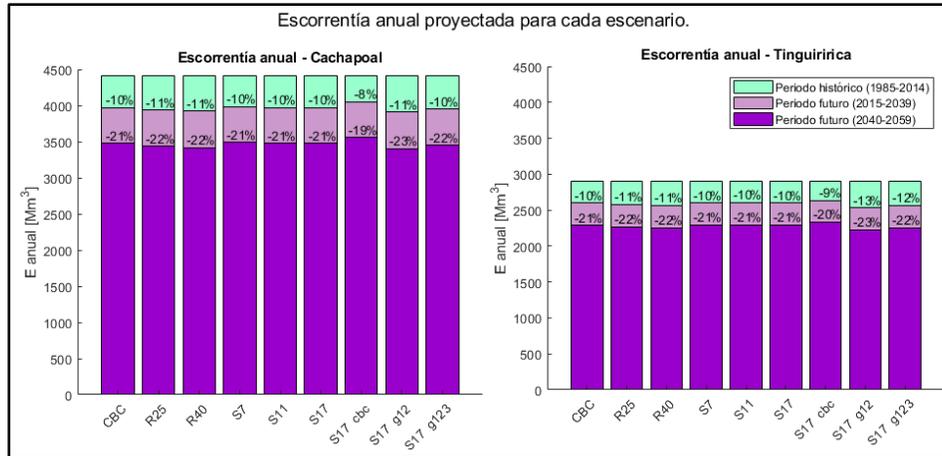


Figura 5: Volumen de escorrentía (en Mm³), en cada periodo. Y en el interior de las barras se presenta el porcentaje de cambio la escorrentía futura respecto al periodo histórico (1985-2015).

A partir de la Figura 5 en la subcuenca de Cachapoal se aprecia una escorrentía histórica de cerca de 4500 [Mm³], luego entre escenarios no se presentan diferencias significativas, donde para el periodo (2015-2039) se aprecia que la escorrentía se reduce a 4000 [Mm³], y en el periodo (2040-2059) a 3500 [Mm³]. Mientras que en la subcuenca de Tinguiririca se aprecia una escorrentía histórica de cerca de 2850 [Mm³], luego entre escenarios tampoco se presentan diferencias significativas, donde para el periodo (2015-2039) se aprecia que la escorrentía se reduce a 2650 [Mm³] y en (2040-2059) a 2450 [Mm³]. En ambas subcuencas, ordenando los escenarios según reducción de escorrentía se tiene: S17_g12 > S17_g123 ≈ R40 ≈ R25 > CBC ≈ S7 ≈ S11 ≈ S17

Cambio demanda a nivel de cuenca

Se presentan en la Figura 6, para cada subcuenca, un gráfico de la demanda anual para el periodo histórico y los periodos futuros (2014-2039 y 2040-2069), y un gráfico de la demanda evapotranspirativa mensual para el promedio del periodo histórico (2015-2059).

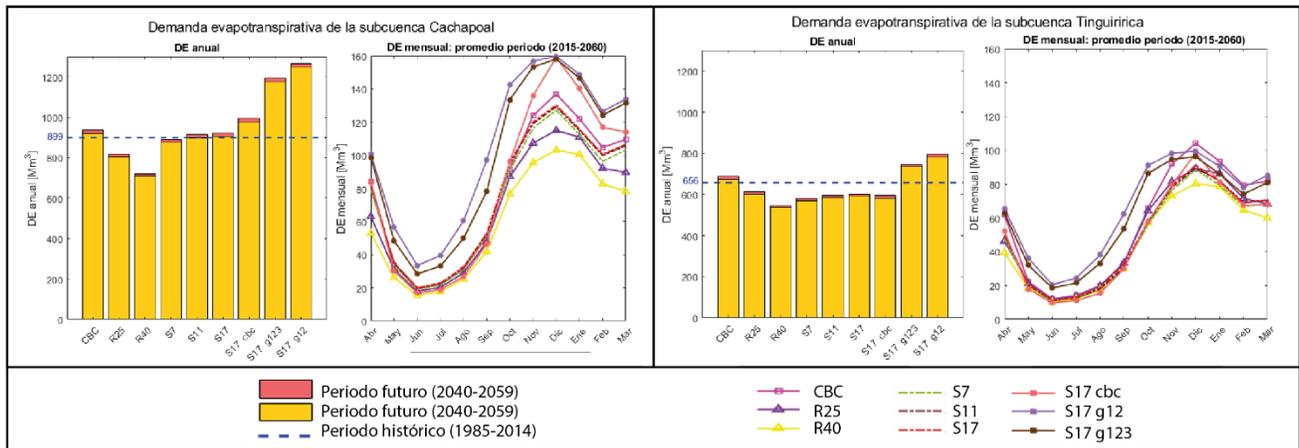


Figura 6: Demanda evapotranspirativa de cada escenario.

A partir de la Figura 6, se aprecia en ambas subcuencas la demanda evapotranspirativa presenta su mínimo en el mes de junio, incrementando hasta llegar a septiembre donde crece a una tasa mayor. Luego de octubre a marzo se identifican la mayor demanda, con máximo en el mes de diciembre. En Cachapoal, los escenarios ordenados según su demanda evapotranspirativa anual, corresponden a lo siguiente: $S17_g12 > S17_g123 > S17_cbc > CBC \approx S17 \approx S11 > S7 > R25 > R40$

Para Cachapoal, la demanda evapotranspirativa anual del CBC en el periodo histórico es de 899 [Mm³] y en el periodo futuro se incrementa. Se aprecia, además, que solo los escenarios R25, R40 y S7, comprende una reducción de la demanda evapotranspirativa a un nivel menor que la actual, pero la reducción de S7 es despreciable. Luego, los escenarios ordenados según su demanda evapotranspirativa anual, corresponden a lo siguiente: $S17_g12 > S17_g123 > CBC > R25 \approx S11 \approx S17 \approx S17_cbc > S7 > R40$

Para Tinguiririca, la demanda evapotranspirativa anual del CBC en el periodo histórico corresponde a 656 [Mm³], con lo cual se aprecia que el CBC en el periodo futuro se incrementa, y solo los escenarios S17_g12 y S17_g123, comprende un aumento de la demanda evapotranspirativa con respecto a este nivel histórico, mientras que el resto de los escenarios reducen a un nivel más bajo que la demanda evapotranspirativa actual.

Balace entre escorrentía disponible y demanda hídrica total superficial

En la Figura 7 se compara a nivel de volumen mensual, la escorrentía y la demanda hídrica total superficial de cada escenario, lo cual comprende la suma de la demanda evapotranspirativa simulada con el modelo y la suma de derechos superficiales consuntivos de usos distintos al de riego. En estos gráficos, se presenta un balance para el periodo futuro (2015-2039 y 2040-2059), en donde la escorrentía futura se representa como gráfico de área, en donde a partir de los cuatro GCMs se obtiene un valor mínimo y máximo para la escorrentía, cuyos valores se presentan como límites. Mientras que la escorrentía histórica se presenta como línea segmentada de color azul.

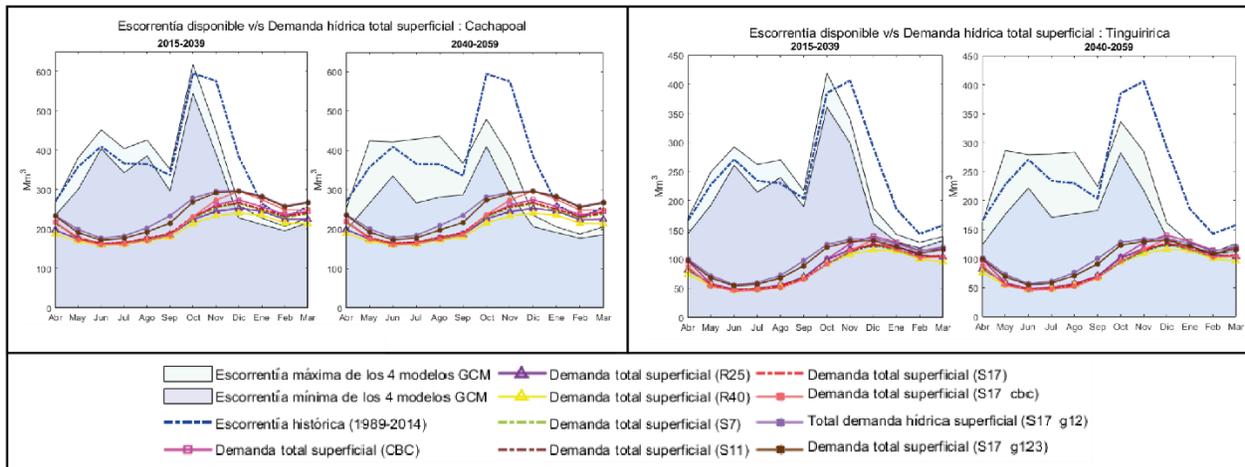


Figura 7: Comparación entre escorrentía y demanda hídrica total superficial.

En cuanto a la escorrentía, en ambas subcuencas se observa que la escorrentía histórica de mayo a septiembre se ubica en los límites de la escorrentía futura, para ambos periodos. Luego, en el periodo futuro (2040-2059) se aprecia una mayor dispersión del valor de la escorrentía en los meses de mayo a septiembre. Además, en el periodo futuro (2015-2039) se aprecia que a partir del mes de octubre la escorrentía futura es menor a la histórica, mientras que para el periodo futuro (2040-2059), esto ocurre antes, en el mes de septiembre, presentándose una reducción del caudal de deshielo de mayor magnitud.

En Cachapoal, en cuanto a la demanda evapotranspirativa, en el periodo futuro (2015-2039) se aprecia, que existe déficit de escorrentía desde el mes de diciembre a marzo, donde en el mes de diciembre, solo los escenarios R25 y R40 están bajo el límite superior de la escorrentía futura, sin embargo, de enero a marzo todos los escenarios presentan déficit. Luego, en el periodo de (2040-2059) se tiene que desde diciembre a marzo se presenta déficit para todos los escenarios planteados.

En Tinguiririca, en cuanto a la demanda evapotranspirativa, en el periodo futuro (2015-2039) se aprecia, que no existe déficit, incluso en los meses de mayor demanda. Sin embargo, en el periodo de (2040-2059) se tiene que desde diciembre a marzo se puede suplir la demanda, pero de manera acotada, donde los escenarios CBC, S17_g12 y S17_g123, en los meses de enero y febrero pasan a tener déficit. Cabe notar que en cuanto a volumen anual, el escenario S17_g123 tiene mayor demanda evapotranspirativa que el CBC, sin embargo, como se aprecia en la Figura 7 en el mes de noviembre el escenario CBC comienza a superar el escenario S17_g123, lo cual está ligado al cambio en la estacionalidad de los cultivos de los grupos 1, 2 y 3 con respecto a los cultivos del CBC. Además, en el periodo de (2040-2059) se aprecia que solamente el escenario R40 se encuentra en el límite inferior de la escorrentía futura proyectada, por lo que sería recomendable en cualquier situación.

5. CONCLUSIÓN

En ambas subcuencas, se proyecta déficit de la precipitación con respecto al periodo histórico, en los meses preferentes de lluvias (de abril a septiembre), presentando un leve aumento en las precipitaciones de agosto. Se proyecta la disminución de la escorrentía de deshielo en los meses de

septiembre a octubre, lo que va acompañado de un aumento en menor medida de la escorrentía durante los meses de invierno. En particular, la reducción de la escorrentía se proyecta que se inicie en el mes de octubre para el periodo 2015-2039, y en septiembre para el periodo 2040-2059. El porcentaje de reducción de la escorrentía es cercana al 10% en los años 2015-2039 y al 20% en los años 2040-2059, con respecto al periodo histórico.

En cuanto a los escenarios planteados, se concluye que, a partir de la utilización de ubicación óptima y el uso de una distribución de cultivos adecuada, en donde se fomente el cultivo de especies de menor demanda, se logra reducir la demanda evapotranspirativa total de la cuenca. Sin embargo, esto es solo aplicable para Tinguiririca.

Luego, en la comparación entre disponibilidad y demanda hídrica total, para Cachapoal, se concluye que para el periodo 2015-2039 se proyecta déficit entre enero y marzo para todos los escenarios, mientras que para el periodo 2040-2059, entre diciembre a marzo se presenta déficit para todos los escenarios. En Tinguiririca, para el periodo 2015-2039 no se proyecta déficit de escorrentía, y para el periodo 2040-2059 entre diciembre a marzo se supe la demanda de manera acotada, donde los escenarios CBC, S17_g12 y S17_g123 en los meses de enero y febrero pasan a tener déficit. En particular, el escenario R40 se mantiene en el límite inferior de la escorrentía, por lo cual se recomienda como escenario.

Por ello, a pesar de que Tinguiririca presenta escenarios en los cuales se alcanza a suplir la demanda, para el periodo 2040-2059 la demanda se supe de manera acotada, por lo que para ambas cuencas se recomienda utilizar los escenarios de menor demanda y el empleo de técnicas de almacenamiento de la escorrentía. Debido a que la reducción del caudal de deshielo es relevante, esto motiva un cambio en la forma en que se ha utilizado el recurso en los años anteriores, en donde se dependía en gran medida de este caudal.

AGRADECIMIENTO

Powered@NLHPC: Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02).

REFERENCIAS

ASF DAAC (2019), ALOS PALSAR Radiometric Terrain Corrected High res; © JAXA / METI 2011. Acceso a través de ASF DAAC el 30 de septiembre de 2019.

Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J. P., & Valdivieso, J. (2018). Projected hydroclimate changes over Andean basins in central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios. *Climatic Change*, 150(3-4), 131-147.

Budde, N., Mendoza, P., Vasquez, N., Alvarez, C., & Barría, P. (2020). Diagnóstico de la información de derechos de agua en Chile, Santiago, Chile. XXIV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.

Cuo, L., Zhang, Y., Gao, Y., Hao, Z., & Cairang, L. (2013). The impacts of climate change and land cover/use transition on the hydrology in the upper Yellow River Basin, China. *Journal of Hydrology*, 502, 37-52.

DGA (2018), Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas norte y centro. SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Realizado por: Fundación para la transferencia tecnológica Pontificia Universidad Católica de Chile.

García Nájera, J. M. (1954). Pendientes máximas admisibles en las tierras de cultivo y cálculo de las terrazas intermitentes con desagüe para la conservación del suelo (banquetas de infiltración). Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias. Madrid.

Garg, V., Aggarwal, S. P., Gupta, P. K., Nikam, B. R., Thakur, P. K., Srivastav, S. K., & Kumar, A. S. (2017). Assessment of land use land cover change impact on hydrological regime of a basin. *Environmental Earth Sciences*, 76(18), 635.

Greene, E. M., Liston, G. E., & Pielke Sr, R. A. (1999). Relationships between landscape, snowcover depletion, and regional weather and climate. *Hydrological Processes*, 13(14-15), 2453-2466.

Hrachowitz, M., Clark, M., P. (2017). Hess Opinions: The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology.

Información para el Desarrollo Productivo Ltda. (INFODEP) por Santibáñez, F. et al (2016). Elaboración de una base digital del clima comunal de Chile: línea base (1980-2010) y proyección al año 2050. Informe final Julio 2016. Elaborado en el marco del Proyecto "Tercera Comunicación Nacional sobre cambio climático". Ministerio del Medio Ambiente. Departamento de Cambio Climático.

Liang, Xu, Lettenmaier, Dennis P. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*, vol. 99(D7). 14,415-14,428, jul. 1994.

Liu, Y., Zhang, X., Xia, D., You, J., Rong, Y., & Bakir, M. (2013). Impacts of land-use and climate changes on hydrologic processes in the Qingyi River watershed, China. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(11), 1495-1512.
Pielke, R. A., & Avissar, R. (1990). Influence of landscape structure on local and regional climate. *Landscape Ecology*, 4(2-3), 133-155.

MOP (2016) Atlas del Agua, A. (2016). Chile. Santiago.

Zhao, Y., Feng, D., Yu, L., Wang, X., Chen, Y., Bai, Y., ... & Radke, J. D. (2016). Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data. *Remote Sensing of Environment*, 183, 170-185.